

UCH-FC
Q. Ambiental
C 352
C.1



FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

**“DESARROLLO DE UN ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN METÁLICA DE
SEDIMENTOS MARINOS”**

Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de:

Químico Ambiental

Marcela Andrea Castillo Reyes

Director de Seminario de Título y Profesor Patrocinante: Dra. Isel Cortés N.

Octubre de 2009
Santiago - Chile



INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por el o (la) candidato (a):

MARCELA ANDREA CASTILLO REYES

“DESARROLLO DE UN ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN METÁLICA DE
SEDIMENTOS MARINOS”

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Químico Ambiental

COMISIÓN DE EVALUACIÓN

Dra. Isel Cortés N.
**Director Seminario de Título
y Profesor Patrocinante**

Prof. María Inés Toral
Corrector

Dra. María Angélica Rubio
Corrector

Se muestran tres firmas manuscritas en azul sobre líneas horizontales. A la derecha de las firmas se encuentra un sello circular de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile, con el texto "FACULTAD DE CIENCIAS", "BIBLIOTECA CENTRAL" y "UNIVERSIDAD DE CHILE".

Santiago de Chile, octubre de 2009

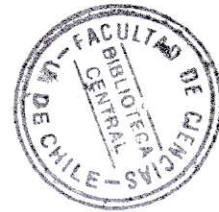


Un día lunes primero de abril de 1985 nací en La Serena junto a dos hermanas más, sí, puedo decir que nunca he estado completamente sola en la vida.

A los seis años llegué a Santiago junto a mis hermanas, hermano mayor, mis dos padres y Carmen, que también me crió, y han estado junto a mí durante toda mi vida escolar, en el Colegio Carmela Carvajal de Prat y universitaria.

En el año 2003 ingresé a la carrera de Química Ambiental en el Campus Gómez Millas desde donde hoy estoy cerrando mi ciclo con este seminario de pre grado.

Marcela Andrea Castillo Reyes.



A mi familia: papá, mamá, manana, janny, Rodrigo y Carmen; que estuvieron a mi lado durante todos los momentos felices y complicados de mi vida universitaria. Como también a mis queridísimos amigos, Kary, Geral, Pancho y Negrito, que entre risas y estudios construimos el fuerte lazo que nos une.

A todos ustedes gracias por ayudar de una u otra manera a terminar esta etapa y por saber que seguiré contando con su apoyo y amistad durante el resto de mi vida.

Agradezco al Laboratorio de Química y Referencia Medio Ambiental del Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA) por el apoyo prestado para el desarrollo de este Seminario de Título, a analistas químicos y especialmente a Dr. Isel Cortés N. que me guío y ayudó durante todo este periodo.

Como también a todos mis compañeros de carrera que colaboraron y estuvieron conmigo en el término de esta etapa universitaria.



ÍNDICE



I. INTRODUCCIÓN.	1
Generalidades de la contaminación por metales en el medio marino.	3
Hipótesis.	7
Objetivo general.	7
Objetivos específicos.	8
II. ANTECEDENTES GENERALES.	9
Sedimentos marinos como reservorio de contaminantes.	9
Impactos de la contaminación por metales pesados.	16
Herramientas para la gestión y la toma de decisiones a partir de mediciones experimentales.	25
Índices como herramientas de apoyo a la gestión y la toma de decisiones.	29
Introducción al desarrollo de índices varios.	29
Índices ambientales	33
Criterios para evaluar contaminación por metales.	37
Protocolo general y supuestos para el desarrollo de un índice ambiental.	41
Ejemplos de índices de contaminación metálica en sedimentos.	43
Comparación con estándares internacionales, guías de calidad.	46
III. PARTE EXPERIMENTAL	
Breve descripción de la zona de muestreo y de la procedencia de los datos.	51



Generalidades del procedimiento para formulación del índice.	59
Paquetes estadísticos.	60
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	61
Alternativa de índice 1.1	61
Selección de funciones de calidad.	61
Selección de valores base para funciones de calidad.	61
Selección de valores límites.	62
Funciones.	64
Ponderación.	75
Diseño final y resultado.	76
Alternativa de índice 1.2	77
Selección de funciones de calidad.	77
Ponderación	78
Obtención de pesos de componentes.	78
Selección de componentes.	80
Diseño final y resultados.	85
Alternativa de índice 2.1	87
Selección de valores bases para razones.	87
Ponderación.	87
Diseño final y resultados.	88
Alternativa de índice 2.2	90
Selección de valores base para razones.	90



Ponderación	90
Diseño final y resultados.	90
Comparación general y propuesta final.	92
Comparación de alternativas.	92
Evaluación de resultados y su interpretación ambiental.	97
V. CONCLUSIONES.	100
VI. REFERENCIAS.	102
VII. ANEXOS.	106



Índice de Tablas

1. Índice ICAP relacionado con tipos de episodios críticos	34
2. Ejemplos de Índices Ambientales utilizados internacionalmente	36
3. Estudios de contaminación por metales en sedimentos	38
4. Índices aplicados a ambientes de estuarios	44
5. Descripción de valores límites de Guías de Calidad de sedimentos marinos	48
6. Concentraciones para metales de Guías internacionales de Calidad de sedimentos marinos	49
7. Programa Microondas Digestión Sedimentos marinos	54
8. Límites de detección	56
9. Precisión y exactitud del método	58
10. Valores Bases de metales.	62
11. Valores Límites de metales	63
12. Valores críticos correspondientes a porcentajes de calidad	65
13. Funciones de Calidad de Metales	70
14. Análisis principales componentes	79
15. Pesos de los Principales Componentes.	81
16. Agrupación de metales	82
17. Ventajas y desventajas de alternativas de índices	93
18. Condición de contaminación para muestras de referencias	96

19. Comparación distintas condiciones % de alternativas de índices	98
--	----

Índice de Figuras

1. Metales en sistemas acuáticos	14
2. Pirámide de Información desarrollo de Índice	26
3. Descripción gráfica de la relación entre la respuesta del indicador, el grado de la perturbación y el umbral para la acción de gestión o decisión.	31
4. Ejemplo conceptual de rangos de efectos sobre los sedimentos asociados a sedimentos.	47
5. Centro de Cultivo en la X Región	51
6. Mapa localización de muestras de sedimento marino	52
7. Sedimento Marino de Referencia	57
8. Alternativas de índice	59
9. Gráfico Calidad de Cd	66
10. Gráfico Calidad de Zn	67
11. Gráfico Calidad de Cr	67
12. Gráfico Calidad de Cu	68
13. Gráfico Calidad de Ni	68
14. Gráfico Calidad de Pb	69
15. Variación de calidad (%) en 26 muestras de sedimento marino para	

cadmio.	71
16. Variación de calidad (%) en 26 muestras de sedimento marino para zinc.	72
17. Variación de calidad (%) en 26 muestras de sedimento marino para cromo.	72
18. Variación de calidad (%) en 26 muestras de sedimento marino para cobre.	73
19. Variación de calidad (%) en 26 muestras de sedimento marino para níquel	73
20. Variación de calidad (%) en 26 muestras de sedimento marino para plomo.	74
21. Gráfico resultado Alternativa 1.1	76
22. Gráfico de Sedimentación	80
23. Diagrama de dispersión	83
24. Gráfico de pesos de los componentes principales	84
25. Gráfico resultado Alternativa 1.2	86
26. Gráfico resultado Alternativa 2.1	89
27. Gráfico resultado Alternativa 2.2	91
28. Gráfico resultado con ICF	95

Lista de Abreviaturas.

ANZECC. Australian and New Zealand Environment and Conservation Council,
Agriculture and Resource Management Council of Australia and New
Zealand

CCME. Canadian Council of Ministries of the Environment

ERL. Rango de bajo efecto

ERM. Rango de mediano efecto

ICAP. Índice de calidad del aire referido a partículas.

ICAS. Índice de Calidad de Aguas Superficiales.

ICF. Índice de condición de fondo.

IdePC. Índice de percepción de Corrupción.

IDH. Índice de desarrollo Humano

IPC. Índice de Precios al Consumidor.

NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration.

OECD. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico.

PCA. Análisis componentes principales.

PEL. Nivel de probables efectos

PIB. Producto Interno bruto

PNUMA. Programa de las naciones unidas para el medio ambiente.

POAL. Programa de Observación del Ambiente Litoral.

SEIA. Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.

TEL. Nivel umbral de efectos

VLI. Valor límite inferior.

VLS. Valor límite superior.

RESUMEN

La calidad ambiental de los sedimentos marinos se relaciona con los cambios en su composición producto de la acción combinada del vertido de contaminantes de origen antrópico y su exposición en los ambientes naturales. Por ello, para mejorar la gestión ambiental y proteger estos sedimentos, es necesario el desarrollo de herramientas que indiquen el nivel de calidad o deterioro (contaminación) que permitan un manejo adecuado de los mismos. Recientemente, ha sido propuesto un índice de condición de fondo, el cual permite conocer la condición de anoxia del sedimento marino, pero es necesario conocer también el nivel de contaminación metálica de éstos. En el presente trabajo se determinan las concentraciones de metales presentes en sedimentos marinos obtenidos de zonas con alta y baja intervención antrópica, también se definen valores base representativos de cada metal, mediante una digestión ácida y cuantificados con la técnica de espectroscopía de emisión en plasma acoplado inductivamente con detector óptico (ICP-OES). Con los valores de concentraciones de metales obtenidos se desarrolla un índice para evaluar la contaminación de sedimentos marinos con la desviación estimada del valor base. Igualmente se desarrollan comparaciones estadísticas de alternativas de índices evaluando su efectividad en diferentes situaciones. Se desarrollaron cuatro alternativas para el índice, dos mediante funciones de calidad de las cuales una posee ponderaciones relativas para cada indicador (metales; Cr, Cd, Cu, Ni, Pb y Zn) y la otra con ponderaciones logradas con un análisis de principales componentes con la que se logró dos agrupaciones de los metales, por una parte Cr, Cu, Zn y Ni y en un segundo grupo el Pb y Zn. Las otras dos alternativas de índices se

desarrollaron mediante la sumatoria de razones entre el valor del metal encontrado experimentalmente y el valor base. La evaluación de las alternativas propuestas, evidencia la importancia de considerar razonablemente el índice con vistas a obtener interpretaciones ambientalmente relevantes al caso en estudio.

ABSTRACT

The environmental quality of marine sediments is related to changes in product composition of the combined action of the discharge of pollutants from anthropic sources and their exposure to natural environments. Therefore, to improve environmental management and protection of these sediments, it is necessary to develop tools that indicate the level of quality or deterioration (pollution) to properly manage them. It has recently been nominated for a bottom condition index, which allows to know the status of marine sediment anoxia, but it is also necessary to know the level of metal contamination from them. In this paper we determine the concentrations of metals in marine sediments collected from areas with high and low human intervention are also defined values representing each base metal by an acid digestion and quantified by the technique of emission spectroscopy coupled plasma inductively with optical detector (ICP-OES). With the values of metal concentrations is obtained an index to assess pollution of marine sediments to estimate the deviation of the base value. Statistical comparisons of alternative indices to assess its effectiveness in different situations are also developed.

Four alternatives were developed for the index, by two features of which has a relative weighting for each indicator (metals, Cr, Cd, Cu, Ni, Pb and Zn) and the other with weights obtained by an analysis of main components was achieved with the two groups of metals, by a Cr, Cu, Zn and Ni and a second group in the Pb and Zn. The other two alternative indices were developed through the combination of ratios from the experimentally found value of metal and the base value. Alternatives were evaluated

considering the importance of reasonable considerations of the index in order to obtain environmentally relevant interpretations to the case study.

I INTRODUCCION

Durante mucho tiempo el deterioro ambiental en Chile fue aceptado como un mal necesario, no siendo considerado como prioridad por el Estado ni el sector productivo, ya que éstas estaban enfocadas principalmente hacia el aumento de las exportaciones e incremento de la producción. Sin embargo, a mediados de los años 80 los problemas ambientales se agudizaron debiendo el Estado desempeñar un rol activo en su solución.

En Chile, la Ley de Bases Generales del Medio Ambiente, promulgada en 1994, dotó al Estado de diversos instrumentos de gestión para ser utilizados en la implementación de una política ambiental. Entre estos instrumentos de gestión se encuentran de forma explícita el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA); las normas de calidad ambiental, preservación de la naturaleza y conservación del patrimonio ambiental; las normas de emisión; los planes de manejo, prevención o descontaminación y la participación ciudadana. Sin embargo, estos instrumentos generales necesariamente van asociados a evaluaciones y estudios que acompañan y preceden a la toma de decisiones y a las correspondientes acciones para mantener y/o recuperar un ecosistema. En Chile, la Constitución Política del Estado establece “el derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación. Es deber del Estado velar para que este derecho no sea afectado y tutelar la preservación de la naturaleza”.

Por lo anterior, es imperativo encontrar conexiones científicamente fundamentadas entre los resultados obtenidos en estudios ambientales y los encargados de tomar decisiones

respecto de la protección y cuidado de los distintos componentes del medio ambiente. Para lograrlo, se han propuesto variadas herramientas que incluyen mediciones aisladas, mediciones repetitivas durante largos períodos de tiempo, monitoreo continuo, monitoreo en línea, sistemas de información geográfica, índices, indicadores variados, entre otros. Como ejemplo de lo anterior se encuentra el Programa de Observación del Ambiente Litoral (P.O.A.L) cuyo objetivo es determinar las concentraciones de los principales contaminantes marinos y dulceacuícolas que se encuentran bajo la jurisdicción de Directemar. Dentro de este programa, se miden los metales cadmio, cobre, cromo, mercurio, plomo y zinc en sedimentos; evaluando los niveles basales que permiten recopilar información para el establecimiento en el futuro de las propuestas de normas de calidad ambiental.

En este trabajo, se describe el desarrollo de un Índice para evaluar la contaminación por metales en sedimentos marinos. Este Índice permitirá comprender la información resultante de análisis químicos y expresarla convenientemente en escalas de calidad (buenas, regulares, malas). A estas escalas de calidad, en correspondencia, se asocian medidas de gestión específicas. Por ejemplo, para una calidad Buena, las medidas son de carácter conservacionista y preventivo. Mientras que para una calidad Mala, las medidas son de tipo recuperativo, re-establecedoras de condiciones próximas a la situación original, buena o deseable.

1.1 Generalidades de la contaminación por metales en el medio marino.

Muchos de los elementos o sustancias que se vierten al mar se depositan en los sedimentos marinos, ocurriendo así una íntima relación entre agua y sedimento, con intercambio de nutrientes y sustancias contaminantes que pueden alterar las condiciones químicas del ambiente. De este modo un cambio por ejemplo en el pH puede alterar la composición del sistema y los organismos presentes pueden verse afectados por estas modificaciones directamente o por la liberación provocada de contaminantes retenidos en el sedimento.

Dado que el sedimento es una matriz ambiental con condiciones fisicoquímicas propias, las sustancias vertidas al medio acuático pueden ser modificadas al llegar a este medio sólido, por ejemplo los metales pueden ser reducidos u oxidados dependiendo de las condiciones redox de la superficie del sedimento, como también pueden ser rápida o lentamente adsorbidos o desorbidos del mismo. Por todo esto es de vital importancia conocer las condiciones del sedimento para estimar el comportamiento de los diferentes contaminantes vertidos al mar. Consecuentemente, el estado ambiental de esta matriz ambiental constituye la base para la toma de decisiones acerca de la conservación, restauración y/o manejo del medio ambiente.

Los metales pesados son necesarios para los organismos pero sólo en muy bajas concentraciones, ya que son tóxicos a concentraciones más altas. Algunos de los

metales pesados están en concentraciones altas debido a procesos naturales, tales como el ciclo geoquímico, como es el caso del arsénico en algunos lugares del mundo. Pero la gran mayoría de las altas concentraciones de metales pesados (Cu, Pb, Zn, Hg, Ni, Sb, Cd, Cr, Se) se deben a acciones antropogénicas. La acumulación de estos elementos es un gran problema ambiental, ya que forman muy fácilmente asociaciones con compuestos presentes en el medio marino, pudiendo así pasar rápidamente a los organismos y bioacumularse. Además los metales no son biodegradables, por lo que al ser vertidos al medio ambiente, sólo pueden distribuirse en el sedimento, agua y organismos, presentando tiempos muy altos de permanencia en el medio.

En Chile, la contaminación por metales en los sedimentos marinos es un tema de relevancia:

- En primer lugar por la gran extensión de la zona costera, que prácticamente abarca la mitad del país.
- En segundo lugar porque muchas actividades económicas importantes como la salmonicultura o el turismo, dependen de la existencia de ecosistemas marinos saludables.
- En tercer lugar, porque son numerosas las actividades que vierten sus desechos al mar, aportando así contaminantes que llegan a los sedimentos de forma inmediata o con mayor demora.

Los metales pesados se encuentran de manera natural en el medio marino, dependiendo de la composición del material parental. La contaminación puede ocurrir como resultado de fenómenos naturales, como las erupciones de volcanes o por la acción del hombre.

Las tres principales vías de ingreso de los metales pesados al medio marino son:

- Terrestres: Filtraciones de residuos, escorrentías.
- Atmosférica: Erupciones de volcanes, sedimentos de partículas provenientes de chimeneas industriales.
- Directa: Vertidos de RILES y residuos domésticos.

Entre las actividades humanas generadoras de metales pesados se destacan, en primer lugar, las extracciones y faenas mineras; los desechos industriales de amplia gama desde la industria fotográfica, el acabado de metales hasta la refinación del petróleo; la aplicación de plaguicidas y los desechos domésticos.

No resulta una decisión trivial la estimación del nivel de contaminación, considerada como la presencia en el ambiente de sustancias, elementos energía o combinación de ellos, en concentraciones o concentraciones y permanencia superiores o inferiores, según corresponda, a las establecidas en la legislación vigente, en una matriz dinámica y sometida a múltiples interacciones como los sedimentos. Para lograr una aproximación razonable al nivel de deterioro o conservación de un área específica, se necesitan múltiples

informaciones y una manera coherente y razonable de ordenarla, de modo de tener una visión general del fenómeno en toda su dimensión.

Cualquiera sea la vía de entrada al medio marino, o la fuente generadora del desecho, las características generales que hacen especial a la contaminación por metales en el medio marino son las siguientes:

- Toxicidad: a determinadas concentraciones los metales pueden ocasionar la muerte de los seres vivos presentes en el medio.
- Persistencia: como se mencionó anteriormente, los metales no se degradan por lo cual pueden permanecer por largos tiempos en el medio marino.
- Bioacumulación: existen seres vivos que acumulan los metales pesados introduciéndolos de esta manera a la cadena trófica.

De este modo, considerando la complejidad del fenómeno de contaminación metálica en sedimentos marinos, resulta altamente conveniente al Estado en su misión de garantizar el derecho a vivir en un ambiente libre de contaminación, disponer de herramientas que permitan una correcta interpretación de los fenómenos ambientales y entreguen vías para encauzar las acciones de gestión correspondientes.

1.2 Hipótesis:

Disponer de un índice de contaminación de sedimentos marinos permitirá mejorar la toma de decisiones asociadas a la gestión ambiental de los mismos y sentará las bases para un programa de prevención de la contaminación metálica en ambientes marinos.

1.3 Objetivo General:

Desarrollar los fundamentos de un índice de contaminación de sedimentos basado en los contenidos de elementos metálicos.

1.4 Objetivos Específicos:

- Formular y optimizar funciones que describan la calidad de los sedimentos marinos vinculadas con la concentración de metales.
- Validar las funciones optimizadas de calidad considerando resultados experimentales obtenidos en este trabajo.
- Comparar el desempeño de las funciones optimizadas de estado de calidad en muestras matrices de sedimentos marinos, o sea, muestras de sedimentos con contenidos naturales no afectadas por la contaminación.
- Evaluar otros enfoques de construcción de índices de contaminación o calidad de sedimentos, propuestos en la literatura, con datos experimentales obtenidos en este trabajo.

II ANTECEDENTES GENERALES

2.1 Sedimentos marinos como reservorio de contaminantes

Los sedimentos marinos son considerados como un resumidero de una gran cantidad de sustancias y elementos químicos de origen natural o generados por diferentes actividades antrópicas. El estudio de la composición y distribución vertical de los elementos permite conocer la actividad geoquímica e historia de los procesos sedimentarios de un sitio, reflejando el efecto que provocan las entradas de los metales pesados y cambios de acumulación a lo largo del tiempo, lo cual entrega una visión sobre cómo la acumulación de contaminantes puede variar en el espacio.

El sedimento marino está constituido por una matriz compleja de fases detríticas de distinto tamaño (gravas, arenas, fango y arcilla), origen (orgánico e inorgánico) y composición química (silicatos, óxidos de hierro y manganeso, materia orgánica) que dificulta la determinación directa de metales pesados a niveles traza en las técnicas de espectrofotometría de emisión atómica (por ejemplo el plasma acoplado inductivamente) o espectrofotometría de absorción atómica (por ejemplo: con llama, horno de grafito, etc.). Es por ello que la mayoría de los procedimientos analíticos involucran pasos previos de digestión o extracción, de modo de solubilizar químicamente los metales presentes en la muestra sólida.

Los metales son elementos omnipresentes en el medioambiente, de allí que éstos tengan distintos orígenes en las profundidades del lecho marino. Los mismos pueden ser introducidos de forma natural a través de la erosión de las rocas. Además de las fuentes naturales, existen fuentes antropogénicas para la incorporación de metales en el medio marino. Los residuos procedentes de las actividades industriales y manufactureras contaminan el agua con diversos metales. Por ejemplo, la presencia de sales de metales como plomo, zinc, mercurio, plata, níquel, cadmio y arsénico representan un gran riesgo para la flora y fauna marina, dada la toxicidad de estos elementos (Agemian & Chau, 1976).

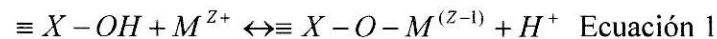
En este contexto, los sedimentos representan uno de los principales reservorios de dichos elementos, los cuales actúan como recursos secundarios de contaminación en el medio ambiente marino, es decir pueden actuar como un archivo de las entradas de estos contaminantes al ecosistema.

Los sedimentos marinos actúan como integradores y concentradores de metales (De Gregori y col. 1996; González y col., 1998; García-Rico y col., 2004).

En los sistemas marinos, los metales pesados son fijados al sedimento por procesos como adsorción y coprecipitación por hidróxidos, óxidos de hierro y manganeso, adsorción en arcillas minerales, precipitación con materia orgánica, reacciones hidrolíticas tanto de iones como de complejos disueltos y por otros mecanismos naturales relacionados con las características fisicoquímicas de los sedimentos (Bruder-Hubscher y col., 2002, Sutherland & Tack, 2002; García-Rico y col., 2004).

Los metales traza presentes en el medio acuático pueden estar como compuestos separados, retenidos en las arcillas, enlazados a óxidos hidratados de hierro o manganeso, como quelatos o enlazados en las superficies coloidales. La solubilidad de los metales depende de los agentes que forman complejos en el medio marino principalmente el ión cloruro.

La retención de los metales traza en el sedimento marino es función de dos principales compuestos: del óxido hidratado de Fe^{+3} y los sulfuros ácidos volátiles. El primero se forma cuando el Fe^{+2} se expone a condiciones oxidantes formando compuestos tales como $Fe(OH)_3$ o $FeOOH$ coprecipitando con los metales pesados (Ecuación 1), siendo éstos liberados al exponerse a condiciones reductoras.



Donde:

$\equiv X - OH$ Corresponde a la superficie de partículas, por ejemplo arcillas, presentes en el sedimento marino.

M^{Z+} Corresponde a un metal oxidado.

Los sulfuros ácidos volátiles retienen metales porque los metales poseen mayor afinidad por el sulfuro que por el hierro, desplazando al hierro II del FeS enlazándose de esta manera el ión con el sulfuro, con lo que se obtienen compuestos insolubles. Esto ocurre en medios reductores. Si el sedimento es expuesto a condiciones oxidantes el sulfuro

pasa a sulfato y los metales retenidos son liberados al medio marino favoreciendo su biodisponibilidad (Manahan S., 2007).

Dependiendo de la forma química y física de los metales, éstos pueden movilizarse y ser transportados a través de las membranas biológicas de las diferentes especies marinas (De Gregori y col., 1996, González y col., 1998; García-Rico y col., 2004).

El transporte de los metales traza se debe principalmente a la adsorción sobre superficies coloidales, estas últimas corresponden a sustancias dispersas en el agua con tamaño de partículas entre 10 nm a 10000 nm. Los coloides se clasifican en hidrofóbicos, hidrofílicos y de asociación. La estabilidad de los coloides en el medio acuático se debe al grado de hidratación y carga superficial, ya que éstas evitan la agregación. El transporte facilitado por coloides provoca que los metales adsorbidos en sus superficies se trasladen rápidamente desde el punto de descarga hacia otras áreas del medio marino.

Es así como además los metales trazas presentan concentraciones relativamente elevadas en los sedimentos superficiales que se encuentran aguas abajo de zonas con asentamientos urbanos, existiendo una estrecha relación en la concentración de los metales, con el tamaño de las partículas y la cantidad de materia orgánica sedimentarias, alterando el equilibrio ecológico y biogeoquímico del ecosistema. En tal sentido, la determinación de metales en los sedimentos es un buen indicador del origen de los contaminantes en el medio y de los impactos que éstos pueden producir en la biota marina. Es necesario destacar que determinados metales pueden no encontrarse

efectivamente enlazados a partículas y pueden ser liberados de los sedimentos y transportados a diferentes locaciones. Otros metales pueden encontrarse en varias especies químicas, por ejemplo, la especiación redox del Fe y Mn, que pueden afectar sus propias movilidades y la movilidad de otros metales en una determinada zona.

Es por esto que las mediciones y los estudios de contaminación por metales en sedimentos acuáticos pueden explicar tales diferencias en la movilidad tomando en consideración la variabilidad espacial y temporal de las entradas, transportes y destino de metales descargados dentro de las aguas marinas costeras.

La importancia de obtener patrones naturales confiables de distribución de metales, radica en que sólo a partir de dichos patrones es posible detectar los niveles de alteración ambiental.

Una vez que los metales pesados alcanzan el mar por la vía de los ríos, experimentan procesos físicos y químicos que favorecen su incorporación a los sedimentos marinos. Por otra parte, los metales que se encuentran en suspensión en el agua, pueden ser absorbidos a través de las superficies del fitoplancton y del material detrítico. Tanto los metales suspendidos como los sedimentados pueden penetrar diferentes componentes del ecosistema, inhibiendo sus funciones vitales (Figura 1).

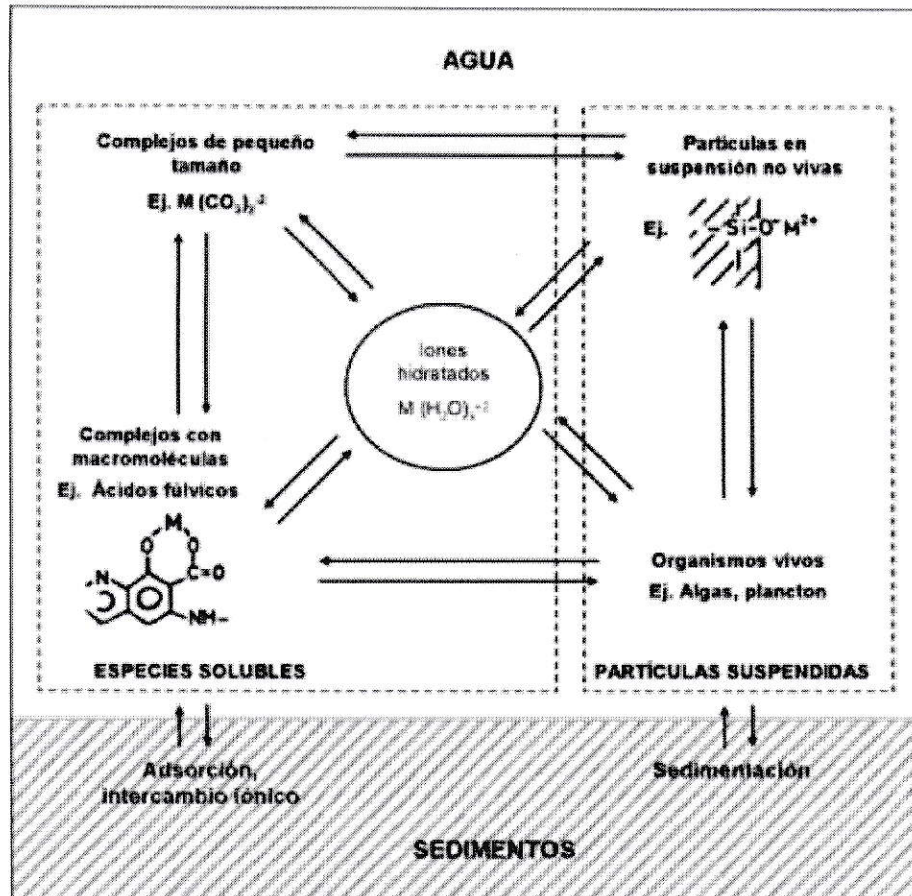


Figura 1: Metales en sistemas acuáticos.

(Pazoz P., 2008)

La contaminación ambiental por metales pesados, se distingue de otros contaminantes químicos por las siguientes particularidades:

1.- Toxicidad: a determinadas concentraciones pueden provocar la muerte por envenenamiento de algunas especies que habitan el medio. Las dosis letales varían según las especies, el estado de desarrollo de los individuos y la presencia de agentes quelantes que contribuyen a aumentar su solubilidad.

2.- Persistencia: no son biodegradables por lo que permanecen en el medio ambiente durante largos períodos de tiempo, pasando sucesivamente de un componente a otro.

3.- Potencial bioacumulación: se conoce que algunos organismos (plantas, algas, erizos, mejillones) son acumuladores de metales pesados, y a partir de su ingestión estos contaminantes podrían introducirse en las redes tróficas.

En general los efectos de la toxicidad de metales pesados pueden ser clasificados en tres principales categorías:

- Bloqueo de los grupos funcionales esenciales de las biomoléculas (es decir, proteínas, enzimas).
- Desplazamiento del ión metálico de una biomolécula.
- Modificación de estructura de biomoléculas.

En su conjunto moluscos tales como crustáceos y oligoquetos son más sensibles al zinc. Por otro lado las algas muestran un cierto grado de inconsistencia hacia los efectos de los metales pesados. En términos generales es posible considerar que las plantas marinas e invertebrados presentan una mayor resistencia al efecto de los metales pesados en comparación con los peces.

Las modificaciones provocadas por la presencia de metales incluyen principalmente una disminución en el número de especies y la eliminación total de especies sensitivas. Algunas especies son capaces de desarrollar mecanismos de resistencia que permiten la acumulación de elevadas concentraciones de metales.

2.1.1 Impactos de la contaminación por metales pesados.

Los metales se encuentran presentes formando parte de todos los seres vivos; éstos son considerados no esenciales cuando no tienen una función biológica conocida, y esenciales, cuando son necesarios para el desarrollo y el crecimiento normal de los organismos, entre los que están el níquel y el zinc. Los metales esenciales y no esenciales resultan altamente tóxicos en altas concentraciones en el medio y en los tejidos de los organismos, ya que provocan perturbaciones en una amplia variedad de sistemas enzimáticos de los compartimientos intracelulares (Paéz – Osuna, 1996a; Jiménez y col., 2006).

El peligro de los elementos metálicos potencialmente tóxicos, depende de su concentración en el medio, de su combinación con compuestos orgánicos presentes en los sedimentos y de su ingreso a las cadenas alimentarias, donde pueden ocurrir procesos de bioconcentración, bioacumulación y biomagnificación.

Cualquier entrada adicional de metales a la columna de agua quedará registrada en los sedimentos, a través de la fracción de metales que reacciona con el material particulado y coloidal al sedimentar (Wen y col., 1999; Ahumada y col., 2004).

Una vez que los metales son incorporados al sedimento, el cambio en las condiciones redox del medio provocado por la diagénesis inicial de la materia orgánica afecta al tipo y a la intensidad de interacción entre el metal y la fase sólida, lo que origina, en muchos casos, una liberación de metales al agua intersticial en la zona más superficial del sedimento (Gaillard y col., 1986; Ciceri y col., 1992; Petersen y col., 1995; Winderlund, 1996; Ponce y col., 2000). Por esta razón, las concentraciones de numerosos metales en los primeros centímetros del agua intersticial pueden llegar a ser varios órdenes de magnitud superiores a las que existen en la columna de agua.

Cabe destacar que a pesar de sus efectos nocivos, los metales pesados (tales como Fe, Zn, Cu y Mn) también tienen un importante rol biológico, dado que son micronutrientes esenciales para el crecimiento de los organismos acuáticos. Otros metales tales como el Hg, Ag y Pb no son necesarios para el crecimiento pero en determinadas concentraciones relativamente bajas son tóxicos. De este modo, los metales pueden ejercer simultáneamente efectos vitales y tóxicos en el equilibrio del ecosistema, dependiendo de la concentración en las cuales se encuentren.

A modo de ejemplo, se describen los efectos ambientales de metales identificados como contaminantes ambientales en varios estudios.

Las sales solubles de metales pesados (como el plomo, cadmio y mercurio) son muy tóxicas y se acumulan en los organismos, lo que permite una vía de ingreso a las cadenas alimentarias. Al ser ingeridos por el hombre, ya sea directamente a través del agua o de alimentos contaminados por metales, se originan enfermedades tales como ceguera, amnesia, raquitismo, miastenia o hasta la muerte.

Metales a nivel traza como el cobre, producen un gran espectro de efectos tóxicos en organismos acuáticos, especialmente en la etapa larvaria (Everaarts & SaralaDevi, 1996; Villar y col., 2000; García-Rico y col., 2004). En el caso del fitoplancton muchos son los metales traza ligados a la nutrición de éste: cobalto, cobre, hierro, manganeso, níquel, molibdeno, selenio, estaño y zinc, estos micronutrientes juegan un rol esencial en su metabolismo y crecimiento; sin embargo desbalances severos de sus concentraciones pueden causar daños de diversa consideración en las células. Cuando especies sensibles del fitoplancton son expuestas a distintas concentraciones de metales traza, los iones metálicos libres actuarán en distinto grado pudiendo provocar efectos como: inhibición del crecimiento, cambios morfológicos y respuestas fisiológicas que dependen de cada especie tratada. (Rodríguez & Rivera, 1995).

La asimilación de cobre y de otros metales tan peligrosos como el cadmio por el fitoplancton en el primer nivel trófico tiene un gran significado ecológico, ya que éstos pueden ser bioacumulados y así transferidos de eslabón a eslabón en la cadena alimentaria (Jennings & Rainbow, 1978; Rodríguez & Rivera, 1995).

El macrobentos, en especial poliquetos (*Arenicola sp.*), pueden concentrar los metales por medio de la absorción desde una solución a través de la superficie de su cuerpo, a partir de la ingesta de alimento o directamente desde el sedimento, mientras que la eliminación de estos contaminantes es por vía fecal o urinaria.

De esta manera la acumulación de contaminantes en los sedimentos del fondo marino y la remoción de esas sustancias son dos de los principales mecanismos en la regulación de la concentración de contaminantes en el medioambiente. Los metales pesados son un importante grupo de contaminantes químicos en las aguas naturales. La contaminación por metales pesados en ecosistemas acuáticos es mejor reflejada en los altos niveles de metales en los sedimentos, macrófitas y animales benthicos, que en los encontrados en los cuerpos de agua propiamente.

A diferencia de los contaminantes orgánicos, los cuales pueden ser degradados en varios pasos o etapas hasta formar compuestos con menor toxicidad, los metales pesados no evolucionan de la misma manera acumulándose en los sedimentos del fondo en cantidades importantes cuando los cuerpos de agua poseen una baja tasa de renovación de agua.

El plomo es un metal escaso; se estima que ocupa el 0,00002 % de la corteza terrestre. Forma compuestos con los estados de oxidación +2 y +4, siendo los más comunes los del estado de oxidación +2, lo que se traduce en que los compuestos formados con

plomo poseen diferentes grados de toxicidad, siendo los de mayor peligrosidad, aquellos enlazados a compuestos orgánicos. El plomo es anfótero por lo que forma sales plumbosas y plúmbicas, así como plumbitos y plumbatos. Gran parte del plomo se obtiene por reciclado de chatarras como las placas de baterías y de las escorias industriales como soldaduras, metal para cojinetes y recubrimientos de cables.

La contaminación del agua por plomo no se origina directamente por éste sino por sus sales solubles en agua que son generadas por las fábricas de pinturas, de acumuladores, por alfarerías con esmaltado, en fototermografía, en pirotecnia, en la coloración a vidrios o por industrias químicas productoras de tetraetilo de plomo (se usa como antidetonante en gasolinas) y por algunas actividades mineras (Shine y col., 1995).

Los compuestos de plomo en los peces originan la formación de una película coagulante y provocan alteraciones hematológicas. En el hombre, el plomo provoca una enfermedad conocida como saturnismo la cual engloba trastornos nerviosos, digestivos y renales.

Por su parte el cadmio posee la tendencia a formar compuestos complejos acuosos en los que se une de uno a cuatro ligandos. La contaminación del agua por cadmio es provocada por las principales áreas de aplicación que arrojan sus desechos a las alcantarillas, como son el acabado de metales, la electrónica, la manufactura de pigmentos (pinturas y agentes colorantes), de baterías (cadmio níquel), de estabilizadores plásticos, de plaguicidas (fungicidas), la electrodeposición o las

aleaciones de hierro, en la producción de hierro y zinc, y en el uso de reactores nucleares.

Los alquil y aril cadmios se usan como catalizadores y las sales de sus ácidos orgánicos (laureato, estearato, palmitato, fenolato, naftenato y benzoato de cadmio) como estabilizadores térmicos y de luz en los plásticos como el cloruro de polivinilo. El uso de estabilizadores de bario-cadmio en plásticos contamina los alimentos almacenados en ellos.

El cobre es uno de los elementos esenciales para el metabolismo de los seres vivos y uno de los más abundantes en la corteza terrestre. Generalmente se encuentra asociado a sulfuros como la calchonita (Cu_2S) y covelita (CuS) y de óxidos como la malaquita ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$).

El cobre se halla en forma natural en el agua de mar en concentraciones bajas, alrededor de 2 $\mu\text{g/L}$ o ppb. A través del proceso de concentración biológica, el cobre es bioacumulado por los organismos vivos filtradores, alcanzando una concentración de varios órdenes de magnitud en los macroinvertebrados (Waldichuk, 1974; Laws, 1981; Scelzo, 1997). La asimilación implica la formación de complejos con sustancias orgánicas, que no son excretados con facilidad.

La utilización de pinturas antiincrustantes (antifouling) en la salmonicultura es una fuente antropogénica de cobre en el medio marino, ya que la mayoría de ellas son a base de óxido cuproso (Cu_2O) compuesto activo que actúa como biocida, el cual se va

liberando paulatinamente hacia el agua. El principal problema radica que además de evitar que se incrusten algas y moluscos a las jaulas, la concentración de cobre en el medio aumenta ocasionando problemas de toxicidad en los organismos (Carmona & Cortés, 2006). También en la acuicultura la utilización de sulfato de cobre es muy alta, ya que es utilizado como antiparasitario, alguicida y como suplemento mineral para la alimentación de peces.

El cobre además es adicionado al alimento para peces de cultivo, en una proporción de 1 - 4 g/kg de alimento seco, esta tasa depende de la especie de pez en cultivo y de las condiciones ambientales (Berntssen y col. 1999, Brooks & Mahnken 2003b; En: Shakouri, 2003).

Recientes evaluaciones en granjas de cultivo de salmón, han revelado localmente elevados niveles de cobre (70 – 265 mg/kg), los cuales exceden valores incluidos en la guía de calidad para sedimentos de la ANZECC (2000), para posibles efectos ecológicos (Forrest y col., 2007).

La presencia de cobre en el medio marino es necesaria para la vida de los organismos, pero sólo a bajísimas concentraciones ya que produce desde intoxicaciones hasta la muerte si ésta es mayor. Un estudio de toxicidad en larvas de camarón demostró que a una concentración de 1000 ppb de cobre ocurría la muerte de todos los organismos en un período de 24 horas, como también que el crecimiento de éstas estuvo directamente relacionado con la concentración de cobre presente en el medio (Scelzo, 2006).

Concentraciones muy pequeñas de cobre en el agua de mar pueden afectar muy fuertemente a los organismos presentes, como se demostró en un estudio donde al exponer durante 96 horas a una concentración de 5 mg/kg de cobre en agua marina moría el 50% de la población de *emerita Análoga*, crustáceo presente en las costas chilenas. También estudios en bivalvos mostraron el comportamiento anterior, donde una concentración de 2 mg/L de cobre en agua marina era totalmente letal para todos los organismos, los que procedían de tres playas de Venezuela las que tenían distinto grado de contaminación por cobre (Acosta & Londeiros, 2004).

El zinc es un elemento esencial que es adicionado al alimento para el cultivo de salmones (30 a 100 mg/kg), esto ayuda a prevenir una disminución en el crecimiento de las especies y permite evitar el incremento de cataratas, enanismo y bajo contenido de zinc en tejidos (Maage y col. 2001; Shakouri, 2003). De este modo, el zinc a medida que se integra a la actividad de cultivo de peces, puede ir acumulándose en los sedimentos por medio de las fecas y del alimento no consumido.

Altas concentraciones de zinc en sedimentos de centros de cultivos de salmón en Canadá y Estados Unidos han sido registrados, esta concentración en sedimentos dentro del perímetro de las jaulas ha llegado a alrededor de 200 mg/kg (Brooks & Mahnken 2003; Shakouri, 2003).

Estudios en sedimentos de jaulas de cultivo en Canadá han revelado un incremento en las concentraciones tanto de cobre como de zinc. En condiciones de anoxia estas

concentraciones se incrementaron a 253 $\mu\text{g/g}$ de zinc, mientras que en condiciones normales medidas a 50 metros desde el límite de jaulas de cultivo en la misma zona registraron concentraciones de zinc dos a tres veces menores (Shakouri, 2003).

La exposición aguda al zinc, reduce la ingestión de alimento y el consumo de oxígeno en un 32%, en los estadios postlarvales de crustáceos (Santos y col., 2000; Jiménez y col., 2006).

El crecimiento y el metabolismo respiratorio son parámetros que reflejan la condición fisiológica general de los organismos y ayudan a evaluar el efecto de los cambios ambientales sobre los mismos. A pesar de que el zinc es un micronutriente esencial, aún en concentraciones muy por debajo de la concentración letal media, deprimen el metabolismo respiratorio y el crecimiento de algunos crustáceos como *Artemia franciscana* (Jiménez y col., 2006).

El níquel está presente principalmente en sus estados de oxidación 0 y +2. El Ni^{2+} forma sales de bromuro, acetato, nitrato y sulfato, las que son solubles en agua (Adriano, 2001). El níquel carbonilo es uno de sus compuestos más tóxicos.

El níquel se utiliza mayormente en la industria para la fabricación de baterías y componentes electrónicos.

El cromo generalmente existe de manera natural en su forma trivalente, siendo prácticamente de fuentes antropogénicas el que se encuentra en forma hexavalente; esta última es la forma más tóxica de este metal.

2.2 Herramientas para la gestión y la toma de decisiones a partir de mediciones experimentales.

El desarrollo de herramientas de gestión es muy importante para la toma de decisiones acerca del medioambiente. Por ejemplo, según esto se podría establecer si se prohíbe o no el vertimiento de sustancias en el mar. De este modo, las herramientas de gestión cumplen un rol preventivo inmediato o como información disponible para conocer y mejorar la condición actual de los sedimentos. Por un razonamiento similar, las herramientas de gestión se involucran en la autorización o no del uso de una zona costera con fines de explotación comercial para cultivo de algas u otras especies acuáticas.

Generalmente, las herramientas de gestión se diseñan a partir de mediciones experimentales directas o sus combinaciones. Entre estas herramientas se encuentran:

Índices: incluyen una combinación comparada de situaciones. Por ejemplo:

- Índice de riesgo ecológico; en los cuales se comparan los resultados de los contaminantes con Guías de Calidad de Sedimentos.
- Índices de enriquecimiento; donde se comparan los resultados de los contaminantes con diferentes líneas bases o niveles de origen disponibles en la literatura.
- Índices de contaminación; donde se integran los contaminantes en una expresión utilizando de valores en estaciones limpias del área de estudio (Caeiro y col., 2005).

Así, los índices son una herramienta que permiten tomar medidas o acciones frente a un aspecto concreto sea éste económico, social o medioambiental. Un índice puede ser considerado como la agregación de indicadores, los cuales se obtienen de manera experimental o a través de recopilación de datos; tal como se muestra en la Figura 2.

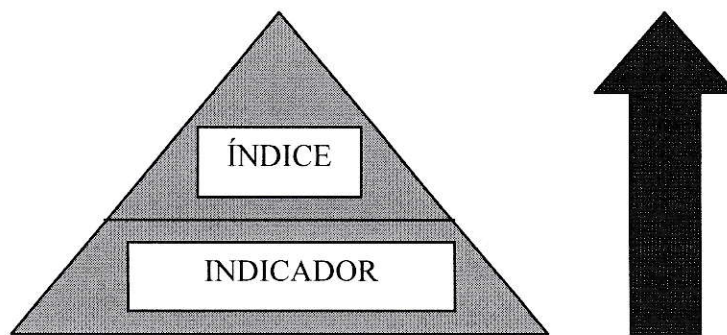


Figura 2: Pirámide de información.

(PNUMA, 2001)

Es así como un índice para la contaminación de metales en sedimentos marinos, permite estimar la condición ambiental mediante valores experimentales, pudiendo comparar de manera objetiva diferentes sitios de muestreo o situaciones, y de este modo encauzar la toma de decisiones. Mediante la agregación de indicadores, se puede indicar niveles en forma de una escala de contaminación de los sedimentos (bueno, regular, malo, etc.), lográndose así una mejor comprensión del estado del medio ambiente, en este caso sedimentos marinos, para el público en general y también para las autoridades ambientales.

- **Redes de monitoreos:** Este tipo de herramientas de gestión es una de las más utilizadas en nuestro país, tanto en calidad de agua como en aire. Las redes, con la tecnología adecuada pueden caracterizar e indicar las concentraciones de contaminantes en puntos geográficos específicos y en tiempo real. De esta manera se aplican políticas medioambientales específicas para las zonas que posean algún nivel de contaminación.

Por ejemplo, para evaluar la contaminación del aire se cuenta con la red MACAM II, que mide la concentración de contaminantes en determinados puntos de Santiago, obteniéndose un registro continuo de éstos; así se pueden tomar medidas de prevención o mitigación. Las estaciones con que cuenta esta red de monitoreo se encuentran ubicadas en:

1. Avenida La Paz
2. Avenida La Florida

3. Avenida Las Condes
4. Parque O'Higgins
5. Pudahuel
6. Cerrillos
7. El Bosque
8. Cerro Navia

Otro ejemplo de redes de monitoreo lo constituye el Programa de Observación del Ambiente Litoral, (POAL) el cual posee una red de estaciones de monitoreo para determinar los niveles de contaminantes presentes en el agua, en los organismos y en los sedimentos de los cuerpos de agua marinos, lacustres y fluviales navegables en Chile.

- **Estándares de Calidad Ambiental:** Esta herramienta de gestión es aplicada a nivel nacional y con ella se miden concentraciones de elementos presentes en agua, suelo o aire. Los estándares de calidad ambiental indican metas las cuales no pueden ser sobrepasadas, para así estar en un ambiente libre de contaminación.

Los Estándares de Calidad ambiental existentes en el País son:

- Estándares de Calidad de Agua
 - Estándares para aguas de regadío.
 - Estándares para aguas destinadas a vida acuática.
 - Estándares para agua destinada a uso recreativo con contacto directo.
 - Estándares para agua destinada a uso recreativo sin contacto directo.

- Estándares para agua destinada a estética.
- Estándares de calidad de aire.
 - Estándares para el control de la contaminación atmosférica.
 - Estándares de emisión de fuentes fijas.
 - Estándares de emisión de material particulado en la Región Metropolitana.
 - Estándares de material particulado a fuentes estacionarias puntuales y grupales en la Región Metropolitana.
 - Estándares de emisión de material particulado en calderas de calefacción para la Región Metropolitana.

Como se observa, las herramientas son diversas y su utilización depende de las condiciones específicas del problema ambiental que se pretenda evaluar.

2.3 Índices como herramientas de apoyo a la gestión y la toma de decisiones.

2.3.1 Introducción al desarrollo de índices varios.

Un índice es un parámetro o valor derivado de diferentes variables que proveen información acerca de un fenómeno o proceso. Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD), sus dos mayores funciones son el reducir el número de mediciones necesarias para alcanzar un conocimiento de las condiciones estudiadas y simplificar el proceso de acceso a los resultados por parte de los usuarios (OECD, 1993).

En general, los Índices Ambientales constituyen una herramienta que simultáneamente permite evaluar el estado de un factor ambiental (agua, suelo, aire) en su momento actual o prospectivo y en consecuencia, permite diseñar las medidas que conduzcan a mejorar o mantener la calidad ambiental del factor en cuestión. Particularmente conocidos resultan por ejemplo, los índices de calidad de aire y su vinculación con las medidas operativas de restringir el tránsito de vehículos sin convertidor catalítico.

El uso de índices tiene como ventajas generales las siguientes:

- Se pueden adaptar a distintas situaciones de uso ambiental (para los que se define la calidad) o a distintas regiones geográficas.
- Establecen criterios que pueden ser entendidos de mejor manera por distintos especialistas.
- Permiten evaluar de forma combinada distintos efectos.
- Posibilidad de evaluación ponderada, a partir de la asignación de importancias relativas para los distintos impactos a que está sometido el medio.
- Permiten una descripción tanto cualitativa como cuantitativa de fácil comprensión.
- Factibilidad de establecer metas para mejorar en la escala de calidad.
- Son generados a partir de bases científicas y técnicas.

Un índice debe responder continuamente a la intensidad de una perturbación; por ejemplo (Figura 3), en algún momento de la curva el ecosistema se verá adversamente afectado y el valor del indicador en ese punto será utilizado como un criterio para tomar

una decisión que permita establecer por un lado un enfoque preventivo para evitar el punto en que el ecosistema sea dañado o estimar el valor límite para un ecosistema.

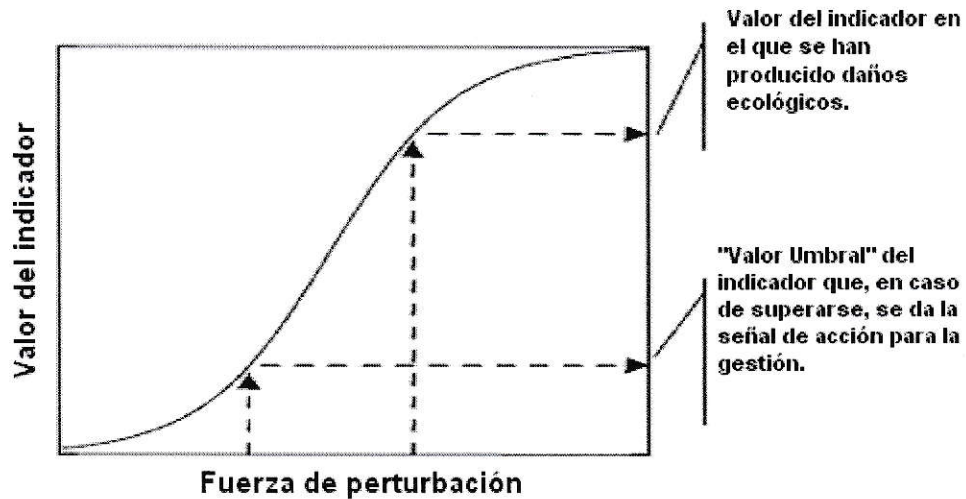


Figura 3: Descripción gráfica de la relación entre la respuesta del indicador, el grado de la perturbación y el umbral para la acción de gestión o decisión.

(ANZECC, 2000.)

En diversas ocasiones es necesario tomar decisiones que permitan actuar con anticipación al daño en un determinado ecosistema. Es así que las acciones de gestión deben ser implementadas a tiempo para prevenir que el ecosistema comience a ser afectado.

De este modo es necesario establecer un umbral más pequeño que aquel valor que indica el comienzo del daño, ¿pero qué tan pequeño debe ser este valor?, dependerá de la naturaleza del impacto, el nivel de nuestro entendimiento de las relaciones entre cambios

en el indicador y el impacto ecológico, además del tiempo necesario para implementar las acciones requeridas.

Los índices son utilizados en gran parte del mundo por organizaciones internacionales, las que frecuentemente necesitan comparar situaciones o condiciones relativamente diferentes y trazar pautas de acción. De este modo se tienen los siguientes índices:

Índices Sociales:

- **Índice de Desarrollo Humano (IDH):** Este instrumento indica el desarrollo de países, regiones o comunas en tres dimensiones (variables), como es la educación, la salud e ingresos. De esta manera se pueden comparar, por ejemplo regiones, para conocer cuáles de ellas necesitan mayor atención. Este índice se desarrolla comparando (para cada variable) el nivel de logro actual versus el valor mínimo de logro y la meta ideal a la que se aspira llegar (valores normativos). El IDH tiene una escala de 0 a 1.
- **Índice de Percepción de Corrupción (IdePC):** Este índice es uno de los más conocidos en esta materia y está basado en encuestas realizadas por instituciones de amplio prestigio a nivel mundial. El IdePC posiciona a los países en una escala de 0 a 10, obteniendo este último los países más transparentes.
- **Índice de mortalidad infantil:** El mismo entrega referencia sobre la cantidad de niños fallecidos, menores a 1 año por cada mil que nacen vivos, siendo

estos últimos indicadores del índice. Mientras menor sea la proporción de niños nacidos vivos que muere en el primer año de vida, se considera que es mejor el desarrollo de la sociedad como un todo.

Índices Económicos:

- Índice de Precios al Consumidor (IPC): Este instrumento indica cómo varía el costo de bienes y servicios; por lo que representa el costo de la vida; en Chile es elaborado mes a mes por el Instituto Nacional de Estadística (INE).
- Producto Interno Bruto (PIB): Evalúa el crecimiento de algún país en particular, este índice posee como unos de sus indicadores la producción de bienes y servicios de una economía.

2.3.2 Índices Ambientales.

En el quehacer ambiental también se utilizan índices variados. Algunos ejemplos lo constituyen:

Índice de calidad del aire referido a partículas (ICAP): Es un índice basado en la cantidad de partículas respirables (PM10) medidas en microgramos presentes en un metro cúbico de aire. El ICAP fue definido por el Decreto Supremo N°59 de 1998 para la Región Metropolitana y relaciona la concentración de PM10 con valores de 0 a 500, los que son derivados de una función lineal segmentada definida por los puntos: 0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

= 0 ICAP, $150 \mu\text{g}/\text{m}^3 = 100 \text{ ICAP}$ y $330 \mu\text{g}/\text{m}^3 = 500 \text{ ICAP}$. Los valores del ICAP son asociados a episodios de contaminación en la cuenca de Santiago (Tabla 1):

Tabla 1: Índice ICAP relacionado con tipos de episodios críticos

(CONAMA, 2006)

Índice de calidad del aire para PM10	Condición de ventilación	Tipo de episodio (niveles)
$0 < \text{ICAP} < 100$	Bueno	No hay
$101 < \text{ICAP} < 200$	Regular	No hay
$201 < \text{ICAP} < 300$	Malo	(nivel 1) Alerta
$301 < \text{ICAP} < 400$	Crítico	(nivel 2) Preemergencia
$401 < \text{ICAP} < 500$	Peligroso	(nivel 2) Preemergencia
Más de 501	Excede	(nivel 3) Emergencia

Índice de calidad de agua: Es un índice desarrollado inicialmente en Estados Unidos, en los años 70, que ha tenido diferentes adaptaciones a situaciones específicas en distintos países. En Chile, en el año 2003, se definió el Índice de Calidad de Aguas Superficiales (ICAS). El mismo incluye como parámetros obligatorios los siguientes: oxígeno disuelto, pH, conductividad eléctrica, coliformes fecales, demanda bioquímica de oxígeno y sólidos suspendidos.

Adicionalmente, este índice considera parámetros relevantes por cuenca. La evaluación de este ICAS en las principales cuencas hidrográficas del país, permitió a la Dirección General de Aguas, establecer planes de objetivos de calidad para cada una de ellas.

Índice de Condición de Fondo (ICF): Es un índice de la condición en que se encuentran los sedimentos obtenidos desde zonas de cultivos de especies salmonídeas, en función de las variables oxígeno disuelto, materia orgánica, potencial redox y pH. Mide las condiciones del sedimento de fondo, asociadas a su nivel de oxigenación o a una condición de anoxia. En su conjunto ofrece una estimación de dos condiciones extremas: una condición mala, en donde se asume una mayor carga orgánica proveniente tanto de fecas de peces como de alimento no consumido y por lo tanto bajos valores de concentración de oxígeno en los fondos; y una condición buena, en la cual la carga de materia orgánica es menor, condiciones oxidantes en los sedimentos y presencia de oxígeno en los fondos. Por otro lado una condición regular, puede ser vulnerable, en tanto no se tomen las medidas adecuadas para llevar este valor del índice a una condición buena. Este ICF fue propuesto en 2008, en el marco del Proyecto INNOVA CHILE-05CN11IPM-25.

De modo general, a nivel internacional, algunos de los índices ambientales más utilizados para evaluar el estado del medio ambiente son los que se mencionan a continuación en la Tabla 2.

Tabla 2: Ejemplos de Índices Ambientales utilizados internacionalmente.

(PNUMA, 2001)

Índice	Fuente	Indicadores/componentes del índice
Índice piloto de sustentabilidad ambiental	Foro Económico Mundial, Centro de Derecho y Política Ambiental de Yale y el Centro Internacional de Información de Ciencias de la Tierra (CIESIN)	64 variables de los siguientes componentes: <ul style="list-style-type: none"> • Sistemas ambientales • Riesgos ambientales • Impacto humano • Capacidad social e institucional • Administración global
Índice del planeta vivo	Fondo Mundial para la Naturaleza, Fundación de nuevas economías y Vigilancia mundial de la conservación.	Indicadores de ecosistemas globales y biodiversidad: <ul style="list-style-type: none"> • Bosques • Agua dulce • Vida marina
Índice de calidad ambiental	Grupo Consultivo en Indicadores de Desarrollo Sustentable	Índice de presión ambiental: <ul style="list-style-type: none"> • Huella ecológica <i>per capita</i> • Riesgo ambiental • Uso del suelo
Proyecto índice de vulnerabilidad ambiental	Comisión del Pacífico Sur en Geociencias Aplicadas (SOPAC), Fidji	Se enfoca en vulnerabilidad ambiental, incluyendo: <ul style="list-style-type: none"> • Ecosistemas • Biodiversidad • Poblaciones
Huella ecológica	Mathis Wackernagel y William Rees, 1996	<ul style="list-style-type: none"> • Suelo cultivado • Bosques • Consumo de combustibles fósiles • Degradación del suelo

2.3.3 Criterios para evaluar contaminación por metales.

En nuestro país, al igual que en muchos otros, se han desarrollado estudios respecto a las concentraciones de metales en los sedimentos marinos, los cuales son comparados con valores presentes en zonas prístinas o de estudios internacionales. En los mismos, generalmente se evalúa si se superan los estándares internacionales o de las zonas libres de contaminación, determinando de esta manera si existe o no contaminación por algún metal en particular en los sedimentos marinos. Sin embargo, estos estudios no consiguen una visión global de la contaminación ambiental de la matriz, en la que generalmente están involucrados todos los metales de origen antropogénico.

En la Tabla3 se muestran estudios sobre sedimentos marinos con distintas evaluaciones de la contaminación.

Tabla 3: Estudios de contaminación por metales en sedimentos.

Lugar	Año	Método cuantificación de metales	Evaluación contaminación	Conclusión
Fiordos Pacífico Sudeste (42,5° a 46,5° S). (Ahumada y col., 2008)	1995	ICP-AES	Comparación con estudios en ambientes similares	No contaminado
Área de Chañaral, Chile. (Ramírez y col., 2005)	2002	ICP-AES	Comparación con concentraciones de sedimentos no contaminados y con valores de línea guía de calidad de sedimentos US- NOAA's	Contaminado con Cobre
Área portuaria y costera de Salina Cruz, Oaxaca, México. (Gonzalez-Lozano y col., 2006)	1998 2000 2002	EAA	Criterios internacionales de calidad de sedimentos (US-NOAA's), índice de geoacumulación (Muller, 1979), factor de enriquecimiento,	Contaminación por algunos metales, que superaron estándares (ERL) y con Índice de geoacumulación de moderado a fuertemente contaminado. El uso del factor de enriquecimiento dio como resultado contaminación antrópica.
NO Península Ibérica. (Fernández y col., 2006)	2004	Voltamperometría de redisolución anódica	Guías de calidad de sedimento (DelValls, Chapman)	Contaminado, tóxico.
Mar Menor (SE de España). (Marín-Guirao y col., 2005)		Voltametría de ánodo con gota de mercurio	Comparación con otras áreas costeras y con estudios anteriores realizados en la misma zona.	Mayor contaminación que en otras áreas
Bahía de Manzanillo, Cuba. Amat y col., 2002)		EAA	Índice de geoacumulación (Muller 1979)	No Contaminado
Fiordos y canales interiores entre los golfos Reloncaví y Corcovado, Chile. (Ahumada y col., 2007)	2004	Bioindicador, gametos de <i>Arbacia spatuligera</i> .	Porcentaje de fecundación	No tóxico

Una de las formas de evaluar la contaminación en sedimentos marinos presentados en la Tabla 3, consiste en el uso de bioindicadores. Éstos constituyen una forma novedosa de estimar los efectos de la capacidad de contaminación de los sedimentos marinos. Lo que se evalúa es el cambio del porcentaje de fertilización, de muerte o disminución de la tasa de crecimiento de una especie en particular y esta “propiedad” se correlaciona con el nivel de contaminación en el sedimento. Un aspecto fundamental en los ensayos realizados con bioindicadores es la selección de los organismos a utilizar. Para ello, se consideran criterios como:

- Se puedan medir fácilmente.
- Ser sensibles al estrés del sistema.
- Responder al estrés de una manera predictiva.
- Actuar con anticipación, es decir, que con su respuesta puedan impedir cambios en el sistema ecológico.

Por su parte, el Índice de Geoacumulación descrito por Muller (1979), es una forma de estimar contaminación, en este caso por metales en los sedimentos, a partir de la concentración geoquímica de los mismos. Para este índice es necesario conocer la concentración geoquímica de cada metal (B_n) y determinar la concentración del metal en la matriz (C_n); como se muestra en la Ecuación 2.

$$I_{geo} = \frac{\text{Log}_2 C_n}{1,5 B_n} \quad \text{Ecuación 2}$$

El valor 1,5 es incorporado en la ecuación para corregir las variaciones de la concentración geoquímica debido a cambios litogénicos. Este índice tiene una escala que varía entre los valores 0 que se otorga cuando se está libre de contaminación a 6 cuando la contaminación es máxima.

Además, la comparación con estándares, considera la verificación del nivel de cumplimiento respecto de estándares o Guías de Calidad de Sedimentos, lo cual será abordado en detalle más adelante.

Finalmente, el uso de los llamados Factores de Enriquecimiento, donde se busca relacionar la concentración del metal con la concentración geoquímica (natural). Se asocia la concentración del metal en la matriz y la concentración geoquímica o de fondo, de igual manera que el Índice de Geoacumulación, sin embargo éste se normaliza con las concentraciones de Al (elemento conservativo y constituyente mayor de minerales de arcilla) o Fe (por su comportamiento similar en ambientes óxicos y anóxicos a muchos elementos traza), para minimizar el efecto del tamaño de grano (Ecuación 3), (Rubio y col., 2000).

$$FE = \frac{(C_M / C_{Al/Fe})_{SEDIMENTO}}{(C_M / C_{Al/Fe})_{FONDO}} \quad \text{Ecuación 3}$$

2.4 Protocolo general y supuestos para el desarrollo de un índice ambiental.

El diseño de índices puede ser descrito a partir de las siguientes etapas o pasos generales:

1. Identificación y descripción de objetivos del índice
2. Identificación de parámetros descriptivos del estado de los factores ambientales para los cuales se va a diseñar el índice (agua, aire, suelo, etc.).
3. Establecer las distintas funciones de estado de situación (o calidad) para cada uno de los parámetros considerados. Estas funciones se establecen sobre la base de criterios de expertos y considerando las funciones descritas en la literatura. De este modo, se transforman cada una de las mediciones experimentales (con sus unidades respectivas) en funciones de modo que todas las mediciones experimentales, independientemente de su orden de magnitud, se traducen en escalas comparables de 0 a 100 % de calidad o estado óptimo deseable (0% de calidad se traduce en condición Mala o No aceptable mientras 100 % de calidad se traduce en la Mejor situación posible).
4. Establecer las ponderaciones a considerar. Es posible considerar que todos los parámetros incluidos en el índice tienen la misma importancia o peso. Pero también es posible asignar pesos diferenciados sobre la base de que aquellos parámetros cuya variación afecta de manera más significativa la calidad del medio, van a tener mayor importancia (y por

tanto mayor peso o significado dentro del total) mientras que aquellos parámetros cuya variación resulte en poca modificación del estado total se les puede considerar como de menor importancia o peso. La suma de todos los pesos será igual a 1.

5. Combinar los parámetros (como funciones de calidad) con sus pesos en una fórmula única. (Se han descrito fórmulas que consideran la sumatoria de los factores o efecto multiplicativo de los factores. Se puede elegir entre una u otra según los criterios de expertos del fenómeno analizado).
6. Establecer las escalas para los distintos resultados obtenidos en la evaluación del índice. Esto es: establecer aquellos valores numéricos del índice que corresponden a las distintas situaciones o calidades (buena, mala, excepcional, etc.).
7. Validar el Índice a partir de datos de prueba, no empleados en la generación del mismo corroborando los supuestos iniciales.

Por su parte, los supuestos considerados para la construcción del índice son los siguientes:

- Las muestras son representativas del área de estudio.
- Las mediciones fueron realizadas con equipos debidamente calibrados a cargo de personal especializado.
- Por lo anterior son mediciones confiables.
- Se supone que todo el deterioro de los sedimentos marinos es por causa de la actividad antropogénica de la zona de estudio.
- Condiciones como irregularidad del fondo, las corrientes marinas no son consideradas.

2.5 Ejemplo de índices de contaminación metálica en sedimentos.

Dentro de la literatura disponible se identificaron varias formulaciones de diferentes índices, para evaluar la contaminación de sedimentos las que se presentan a continuación en la Tabla 4:

Tabla 4. Índices aplicados a ambientes de estuarios.

(Caeiro y col.,2005)

Nombre del índice	Descripción	Autor
1.-Índice de contaminación por metales en sedimentos marinos (q).	$f = g + \frac{t}{0,2g + 5}$ $c = EKd \log \frac{f}{\log 5}$ $q = \frac{C'}{c}$ <p><i>f</i> es la equivalencia de arcilla; <i>g</i> el porcentaje de arcilla; <i>t</i> porcentaje de limo; E y K constantes; <i>d</i> Constante de enriquecimiento que expresa la magnitud de la influencia de la composición de los tamaños de granos en la concentración del metal; <i>C'</i> la verdadera concentración del metal.</p>	Satsmaddjis & Voutsinou-Taliadouri (1985).
2.- Índice químico (proporción a referencia RTR) de la calidad del sedimento (I).	$I = \frac{\sum_{i=1}^n RTR_i}{100} \forall i \quad RTR_i = \frac{v_i}{(v_i)_0}$ <p><i>n</i> es el número total de variables; <i>v_i</i> valor de cada parámetro <i>i</i> ; (<i>v_i</i>)₀ el Valor de referencia de cada parámetro.</p>	Chapman (1990).
3.- Índice de contaminación metálica (MPI).	$MPI = (M_1, M_2, \dots, M_n)^{1/n}$ <p><i>M_n</i> es la concentración del metal <i>n</i> expresando en mg/Kg de peso seco.</p>	Usero y col. (1996).
4.- Índice químico (nuevo máximo RTR) de la calidad del sedimento (NI).	$NI = \frac{\sum_{i=1}^n RTM_i}{(\sum_{i=1}^n RTM_i)_0} \forall i \quad RTM_i = \frac{RTR_i}{RTR - m_i}$ <p>(<i>RTR - m_i</i>) es el valor de RTR máximo obtenido por los parámetros <i>i</i>; (.)₀ el sitio de referencia.</p>	DelValls y col. (1998).
5.- Índice de contaminación de sedimentos marinos (MSPI).	$MSPI = \frac{(\sum_{i=1}^n q_i w_i)^2}{100}$ <p><i>q_i</i> es la clasificación de la calidad del sedimento del contaminante <i>i</i>; <i>w_i</i> es el peso atribuido a la variable <i>i</i>.</p>	Shin & Lam (2001).
6.-Índice de enriquecimiento de metal (SEF).	$SEF = \frac{c_i - c_0}{c_0}$ <p><i>C_i</i> es la concentración total del metal medido en el sedimento; <i>C₀</i> concentración base del metal establecido para el ecosistema estudiado.</p>	Riba y col. (2002).

Las ventajas y desventajas de los índices definidos en la Tabla 4 se presentan a continuación.

En el índice N° 1 de la Tabla la evaluación de la contaminación del sedimento requiere de la relación de su contenido, de la composición granulométrica de una zona limpia de la zona de estudio y la estimación de la concentración del metal para sedimentos no contaminados evaluado en base del tamaño grano; es calculado en una zona específica: Golfo de Grecia y no ha sido probado en otros ecosistemas, también no se incorporan todos los contaminantes en un valor y requiere de mediciones por separado de limo y arcilla. No se define un umbral de máxima contaminación.

El índice N° 2 es útil en monitoreos, incorporando cambios en el tiempo y en la locación; necesita valores de referencia del sitio de estudio.

El índice de contaminación metálica N° 3 no compara la concentración del contaminante con una línea base o guías una de las desventajas es que no se puede clasificar como contaminado o libre de ésta.

En el N° 4 se usa un valor máximo de referencia (estación referencia contaminada). Como en otros índices necesita valores de referencia del sitio de estudio.

El índice de contaminación de sedimentos marinos N° 5 de la Tabla 4 es para un sitio específico. Se necesita un desarrollo de un análisis de principales componentes (PCA), lo importante de este índice es que tiene una significativa correlación con datos de toxicidad en el bento.

El índice de enriquecimiento de metal (N° 6) no agrega todos los contaminantes en un sólo valor como también no se estima un umbral para contaminación máxima.

En general los índices para estuarios recogidos en la Tabla 4 utilizan concentraciones bases de los metales en zonas geográficas específicas, como también no agregan los contaminantes sino que son evaluados por separado. Siendo estos dos puntos importantes para el desarrollo de índices de contaminación.

2.5.1 Comparación con estándares internacionales, guías de calidad.

El grado de contaminación metálica de sedimentos marinos se determina en “gran parte del mundo” mediante guías de calidad desarrolladas para zonas geográficas específicas, las que se enfocan en la protección de la vida marina. Estas guías se conforman determinando el nivel de toxicidad aguda y crónica que poseen organismos de ecosistemas marinos a las sustancias químicas.

Las guías de calidad son desarrolladas por medio de bioensayos, test de toxicidad, que incluyen a organismos bentónicos y pelágicos, logrando de esta manera concentraciones numéricas que se consideran protectoras de todas las formas de vida acuática y todos los aspectos de sus ciclos biológicos durante la exposición por un período indefinido a sustancias asociadas con los sedimentos.

De esta manera las guías de calidad de sedimentos tienen como objetivo general evaluar, proteger y manejar los ecosistemas acuáticos (CCME, 1995).

Como las guías de calidad de sedimentos marinos han sido desarrolladas para zonas geográficas específicas, que poseen particulares condiciones tanto fisicoquímicas como biológicas, en la bibliografía se encuentran gran cantidad de éstas, (Tabla 5). Generalmente los países generan protocolos de guías de calidad para que sus distintos estados generen las propias.

Las guías de calidad de sedimentos marinos definen dos concentraciones límites de metales; la menor que indica que bajo esa concentración los efectos sobre la vida acuática son mínimos y la mayor que indica que sobre ésta son más probables los efectos, de esta manera se encuentran tres rangos de concentraciones, como se ilustra en la Figura 4.

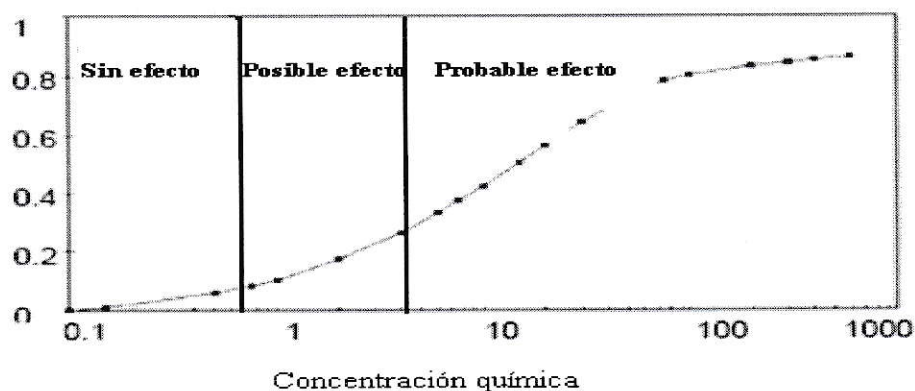


Figura 4: Ejemplo conceptual de rangos de efectos sobre los sedimentos asociados a metales.
(CCME, 1995)

Las concentraciones límites poseen distintas denominaciones dependiendo de la guía de Calidad, tal como se indica en la Tabla 5.

Tabla 5: Descripción de valores límites de Guías de Calidad de sedimentos marinos.

Guía de Calidad	Nombre de valores límites	Acrónimo
Canadian Council of Ministries of the Environment (CCME).	Nivel umbral de efectos	TEL
	Nivel de probables efectos	PEL
National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), EEUU.	Rango de bajo efecto	ERL
	Rango de mediano efecto	ERM
Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand (ANZECC/ARMCANZ) 2000 (provisional).	Valor bajo	ISQG-Low
	Valor alto	ISQG-High

Los Valores límites de concentraciones de metales que proponen las guías de Calidad para sedimentos marinos, se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6: Concentraciones para metales de Guías internacionales de Calidad de sedimentos marinos

Metal (mg/kg de peso seco)	TEL	ERL	ISQG- Low	PEL	ERM	ISQG- High
Cd	0,676	1,2	1,5	4,21	9,6	10
Cr	52,3	81	80	160	370	370
Cu	18,7	34	65	108	270	270
Pb	30,2	46,7	50	112	218	220
Ni	15,9	20,9	21	42,8	51,6	52
Ag	0,733	1	1	1,77	3,7	3,7
Zn	124	150	200	271	410	410

Como se puede apreciar, los valores son numéricamente diferentes y la decisión de adoptar una u otra guía como referente, puede conducir a interpretaciones diferentes o incluso erróneas.

Como se desarrolló en el capítulo, son variados los métodos como se evalúa la contaminación de sedimentos marinos alrededor del mundo, incluyendo comparación con valores de zonas prístinas, la utilización de índices y de guías de calidad para sedimentos. Al presente, Chile no dispone de guías de calidad para metales en sedimentos marinos ni de un criterio unificado para evaluar el significado ambiental de las concentraciones encontradas. Por tanto es necesario el desarrollo de un índice de contaminación por metales de sedimento marino que incluya valores bases y funciones representativas de las costas chilenas.

III PARTE EXPERIMENTAL

3.1 Breve descripción de la zona de muestreo y de la procedencia de los datos.

Para el desarrollo del Índice de Contaminación Metálica se seleccionaron 26 muestras de sedimentos recolectados con draga, en Febrero del 2007, en diferentes puntos del mar interior de Chiloé, Región de Los Lagos, Chile. Las muestras corresponden a sedimentos localizados cercanos a balsas- jaulas de producción de las industrias de salmón presentes en la zona como se ilustra en la Figura 5.



Figura 5: Foto de un Centro de Cultivo en la X Región.

Los puntos de localización de las 26 muestras analizadas se presentan en la Figura 6.

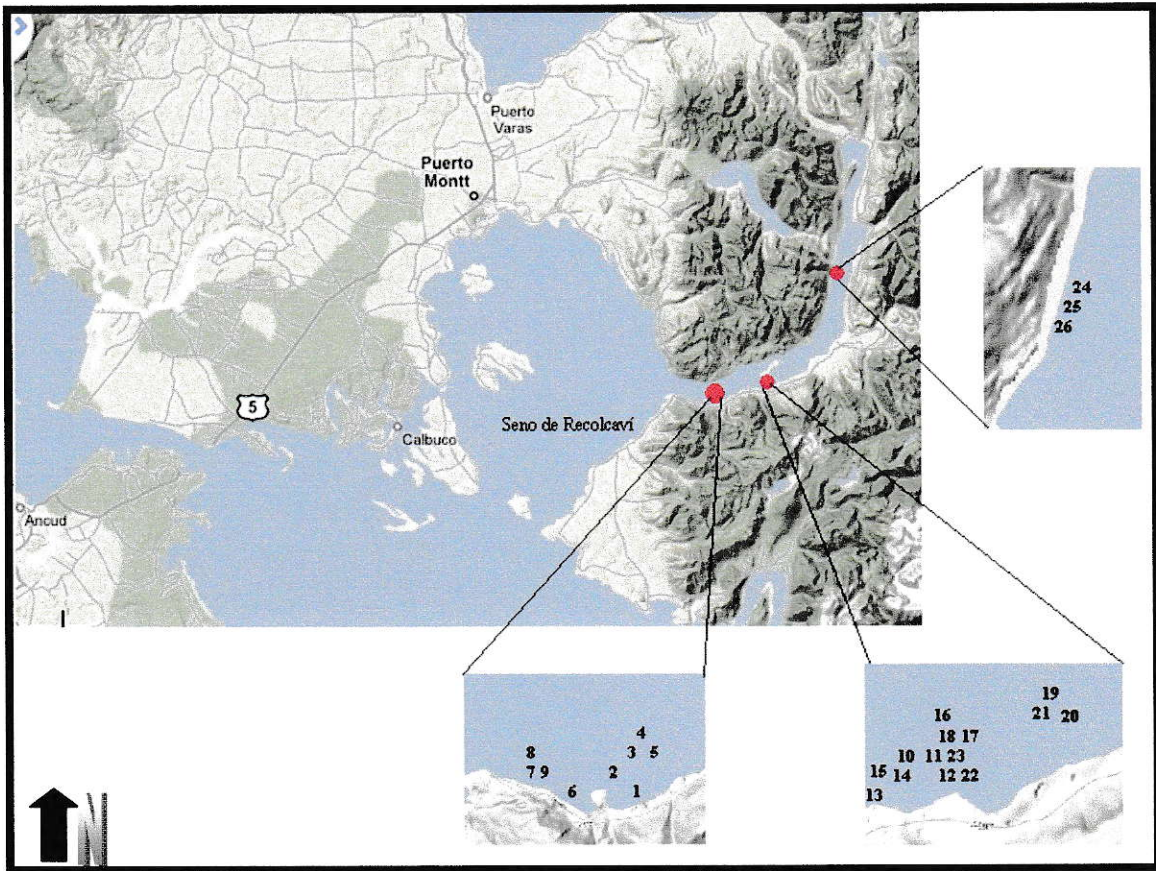


Figura 6: Mapa Localización muestras de sedimento, Región de Los Lagos, Chile.

Tratamiento de sedimentos

Digestión ácida de sedimentos secos tamizados, utilizando horno de microondas (Milestones) con vaso cerrado de teflón. Se pesan aproximadamente 0,3 g de muestra y se adicionan 5 mL de ácido nítrico al 65%, 1 mL de ácido perclórico al 70% y 1 mL de peróxido de hidrógeno, con programación de digestión (Tabla 7), según recomendaciones del fabricante.

Generalmente se utiliza ácido nítrico para la digestión de muestras sólidas con materiales fácilmente oxidables, pero algunas muestras requieren adición de ácido perclórico, clorhídrico, fluorhídrico o sulfúrico para completar la digestión. Las digestiones con $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{SO}_4$ o $\text{HNO}_3\text{-HCl}$ son adecuadas para muestras que contienen materia orgánica fácilmente oxidable; las digestiones con $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ o $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4\text{-HF}$ son necesarias para muestras con contenidos de materia orgánica de difícil oxidación o contenido de silicatos respectivamente. Se realizó la digestión con $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ ya que esta mezcla es recomendable para la determinación de los metales de interés.

Normalmente la técnica de digestión ácida no es total, el procedimiento de digestión asistida por microondas con vaso cerrado se utiliza como alternativa para complementar el proceso de digestión con menor tiempo y mayor seguridad en la operación, siendo además más fácilmente reproducible que la digestión efectuada con plancha calefactora. Además, esta modalidad es recomendable para muestras analizadas por ICP (Eaton y col., 2005).

Tabla 7: Programa Microondas Digestión Sedimentos marinos

Paso	Tiempo	Potencia (W)
1	00:06:00	250
2	00:06:00	400
3	00:06:00	650
4	00:06:00	250
5	00:00:00	0

Posteriormente se reduce volumen en plancha de calentamiento a temperatura no mayor a 60°C hasta volumen final aproximado de 1 mL. el residuo se filtra y se afora a 25 mL con ácido nítrico 1%.

La cuantificación de contenido de metales se realizó por espectroscopía de emisión en plasma acoplado inductivamente con detector óptico (ICP-OES), marca Perkin Elmer 3300 XL, según condiciones optimizadas de operación.

El ICP es utilizado desde 1960 como un método rápido, sensible y conveniente para la determinación de metales en muestras. Los metales disueltos son cuantificados después de la filtración y de la apropiada digestión de las muestras.

Las características del método de ICP se enumeran a continuación:

- Reducción significativa de interferencias químicas por la completa disociación de las moléculas.

- La eficiente excitación proporcionada por el ICP da como resultado bajos límites de detección para muchos elementos.
- Emisión atómica eficiente por las altas temperaturas del plasma.
- Interferencias físicas, asociadas a la nebulización y al proceso de transporte de la muestra. La viscosidad y la tensión superficial pueden ser causantes de error también el alto contenido de sólidos disueltos pueden contribuir al problemas instrumentales. Estas interferencias se minimizan con la disolución de la muestra usando estándares.
- Interferencias químicas, causadas por la formación de compuestos moleculares, efectos de ionización y termoquímicos asociados a la vaporización de la muestra y la atomización en el plasma, normalmente estos efectos no se producen y se pueden minimizar con la selección de las condiciones de operación del equipo. (Eaton y col., 2005).

Los límites de detección (LD) para el método se evaluaron según procedimiento interno de CENMA. El mismo consiste en:

Análisis de 10 blancos digeridos independientemente, para calcular el límite de detección instrumental, expresado en mg/L.

Se evalúa la desviación estándar (SD)

Se calcula el LD_{inst} a partir de 3 veces la desviación estándar.

$$LD_{inst} = 3 SD$$

Análisis de 10 muestras independientes para calcular el límite de detección del método analítico en su conjunto, expresado en mg/kg.

Se evalúa la SD.

Se calcula el LD_{met} .

Se evalúa la razón de conformidad R

$$R = \frac{\text{Promedio de concentración (mg / kg)}}{LD_{met} \text{ (mg / kg)}}$$

Se considera correcto si $4 < R < 10$

Los límites de detección se entregan en la Tabla 8:

Tabla 8: Límites de detección.

	Cd	Zn	Cr	Cu	Ni	Pb
LD_{inst} (mg/L)	$7,70 \cdot 10^{-4}$	$1,56 \cdot 10^{-3}$	$5,43 \cdot 10^{-3}$	$7,70 \cdot 10^{-4}$	$4,58 \cdot 10^{-3}$	$3,18 \cdot 10^{-3}$
LD_{met} (mg/kg)	$6,40 \cdot 10^{-2}$	$1,30 \cdot 10^{-1}$	$4,53 \cdot 10^{-1}$	$2,75 \cdot 10^{-1}$	$3,82 \cdot 10^{-1}$	$2,65 \cdot 10^{-1}$

La precisión se evaluó como coeficiente de variación relativa (CVR) a partir del análisis de 10 muestras digeridas independientemente.

La exactitud se evaluó mediante el análisis de 7 submuestras independientes del material de referencia certificado HPS Certified Referent Material Marine Sediment. Lot. N°830702 (Figura 7).

La precisión y exactitud para cada metal de entregan en la Tabla 9.

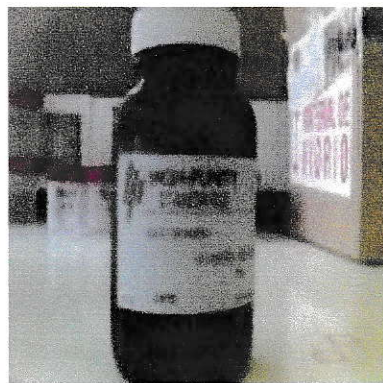


Figura 7: Sedimento Marino de Referencia.

Tabla 9: Precisión y exactitud del método

		Cd	Zn	Cr	Cu	Ni	Pb
Precisión como CVR (%)		6	4	6	5	6	5
Exactitud desde Material de Referencia Certificado	Valor esperado (mg/kg)	0,3	157	128	35,5	35,2	77,2
	Intervalo (mg/kg)	-	137-177	113-143	29,5-41,5	30,4-40	65,2-89,2
	Valor obtenido (mg/kg)		169,9	126	39,8	34,1	

3.2 Generalidades del procedimiento para formulación del Índice.

El procedimiento general para la formulación del Índice de Contaminación Metálica en Sedimentos, se describe a continuación:

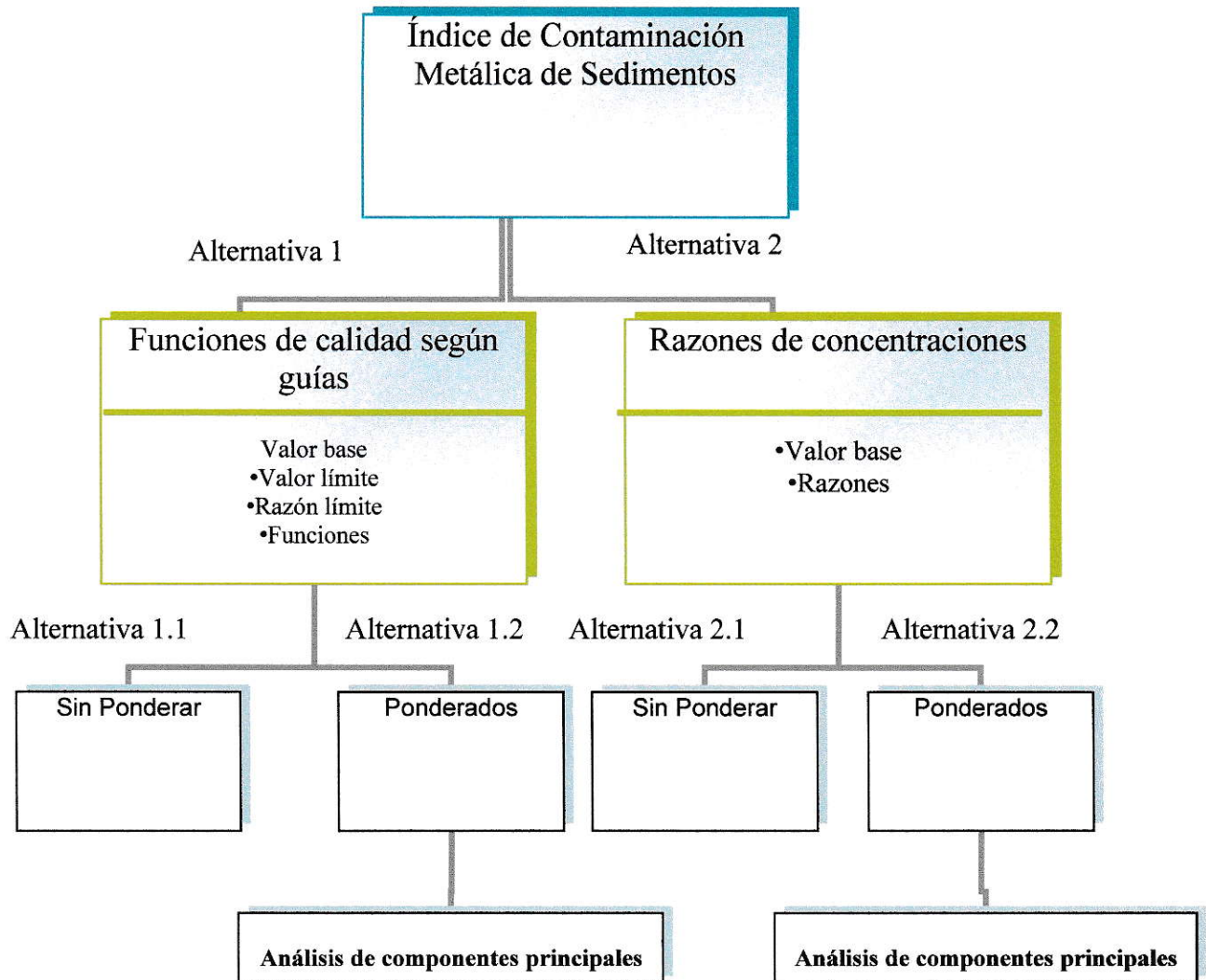


Figura 8: Alternativas de índices.

3.3 Paquetes estadísticos.

Para el procesamiento de los datos se utilizó el paquete estadístico Statgraphics Plus 5.1 en combinación con otros programas profesionales como Excel y OriginLab.

IV RESULTADOS Y DISCUSION

Se obtuvieron las concentraciones de los metales para cada muestra de sedimento marino, los datos experimentales originales se presentan en el Anexo A.

Las muestras N° 6, 7, 8, 19, 20 y 21 corresponden zonas de referencia, por tanto relacionadas a puntos supuestamente libres de contaminación metálica, o al menos alejadas de la influencia antrópica directa.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de evaluar los datos experimentales según las distintas alternativas para la formulación del Índice de Contaminación Metálica de Sedimentos anteriormente descritas.

4.1 Alternativa 1.1

4.1.1 Selección de funciones de calidad

4.1.1.1 Selección de valores base para funciones de calidad

Se evaluaron distintas alternativas para la selección de los valores bases de los sedimentos marinos del área de estudio, considerando resultados reportados en la bibliografía; tales como sedimentos no contaminados (Bryan & Langton, 1992; En: Ahumada y col., 2007) y valores tentativos de línea base para la concentración de metales pesados en los sedimentos de los fiordos Chilenos (Ahumada y col., 1999).

Igualmente se consideraron resultados obtenidos en el laboratorio a partir de análisis de muestras de arena de la zona de Tongoy.

Todos estos valores se recogen en el Anexo B. De ellos, se seleccionaron los menores valores por metal. En la Tabla 10 se recogen los valores base que serán utilizados para la comparación con niveles naturales en todo el trabajo posterior.

Tabla 10: Valores Bases de metales.

Metal	Valor base (mg/kg de peso seco)
Cd	0,32
Cr	29,4
Cu	16,6
Pb	14,2
Ni	18,6
Zn	61,3

4.1.1.2 Selección de Valores límites.

De los valores anteriormente presentados en la Tabla 6, se seleccionaron los valores límites de las concentraciones de metales. Para ello se compararon los valores base con las respectivas guías, seleccionando los menores valores que cumplan la condición:

Valor límite Inferior > Valor base

Y el correspondiente valor límite superior según la guía utilizada.

De este modo, los valores límites seleccionados corresponden a los presentados en la Tabla 11.

Tabla 11: Valores Límites de metales.

Metal	Valor límite inferior, VLI (mg/kg de peso seco)	Valor límite superior, VLS (mg/kg de peso seco)
Cd	0,676	4,21
Cr	52,3	160
Cu	18,7	108
Pb	30,2	112
Ni	20,9	51,6
Zn	124	271

4.1.1.3 Funciones

En este paso se pretende establecer las funciones que describan la situación (o calidad ambiental) para cada uno de los parámetros considerados. Estas funciones sirven para transformar las mediciones experimentales (con sus unidades respectivas) en unidades comparables; de 0 a 100% de calidad o estado óptimo deseable. El nivel 0% de calidad se traduce en condición Mala o No aceptable mientras 100% de calidad se traduce en la Mejor situación posible.

Con los valores base y los valores límites seleccionados se procede a evaluar una razón de la forma:

$$\text{Razón límite} = \frac{\text{Valor límite}}{V_0} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde: V_0 es la concentración base (Tabla 10) y *Valor límite* es la concentración (inferior y superior) presentada en la Tabla 11 para cada metal.

De esta manera se obtienen 2 puntos intermedios, considerando el valor límite inferior y superior respectivo para cada metal, a los que se asigna un porcentaje de Calidad asociado a dichas Razones Límites. Los puntos obtenidos se ajustan matemáticamente de modo de trabajar con una función que permita la interpolación numérica.

En la Tabla 12 se presentan los Valores Críticos correspondientes a porcentajes de Calidad propuestos, siendo en valor 1 el correspondiente al 100% de Calidad de sedimento, es decir, cuando la concentración del metal es igual al determinado como base. El valor correspondiente a 90% y 50% de calidad del sedimento corresponden a los valores críticos obtenidos por las razones Límites determinadas con la ecuación 3 y finalmente 0% de calidad corresponde cuando el valor de la razón límite superior es superado en un 100%, es decir, el doble.

Tabla 12: Valores críticos correspondientes a porcentajes de calidad

Valor crítico	% Calidad	Condición
1	100	Buena
$\frac{VLI}{V_0}$	90	Regular
$\frac{VLS}{V_0}$	50	
$2 \cdot \frac{VLS}{V_0}$	0	Mala

Los valores críticos para la construcción de las curvas de calidad se recogen en el Anexo C.

En las Figuras 9 a 14 se ilustra la variación de la calidad del sedimento con las respectivas razones de Valores Críticos (Tabla 9) de concentración para cada metal, también se encuentra la ecuación de la curva ajustada y su coeficiente de correlación.

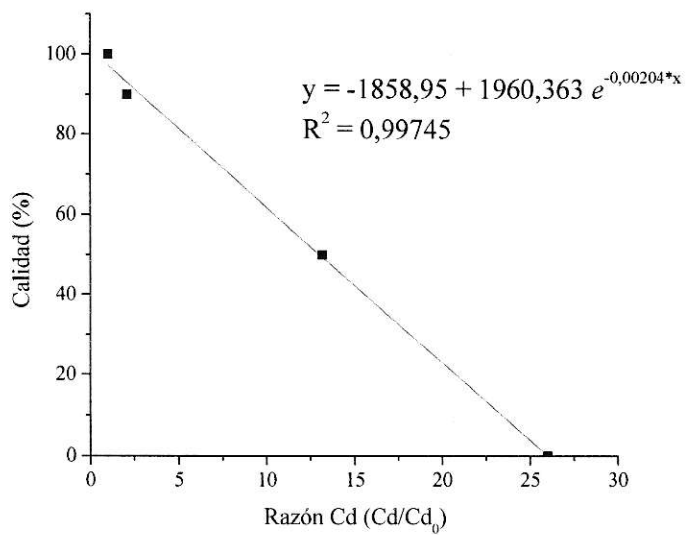


Figura 9: Gráfico calidad de Cd

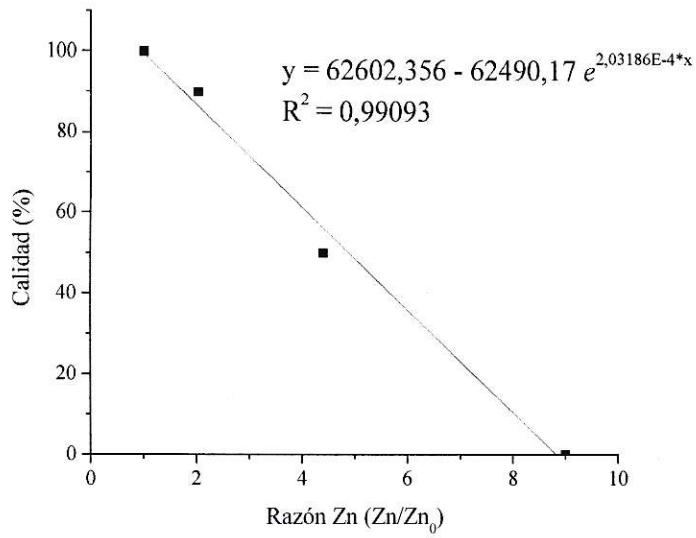


Figura 10: Gráfico calidad de Zn.

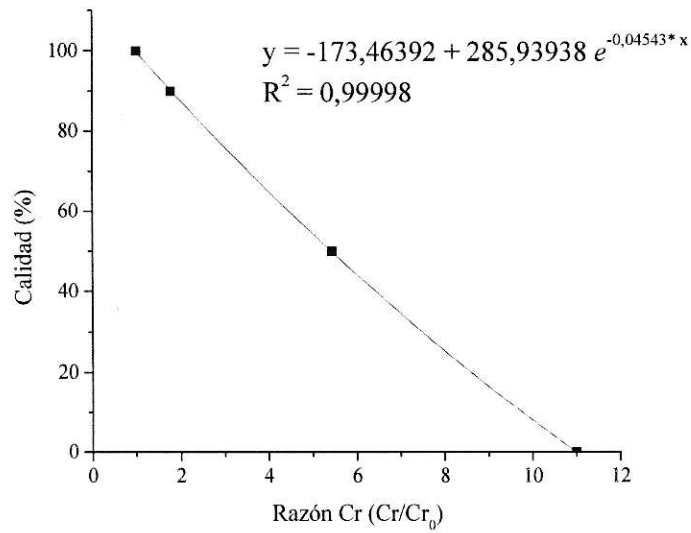


Figura 11: Gráfico calidad de Cr.

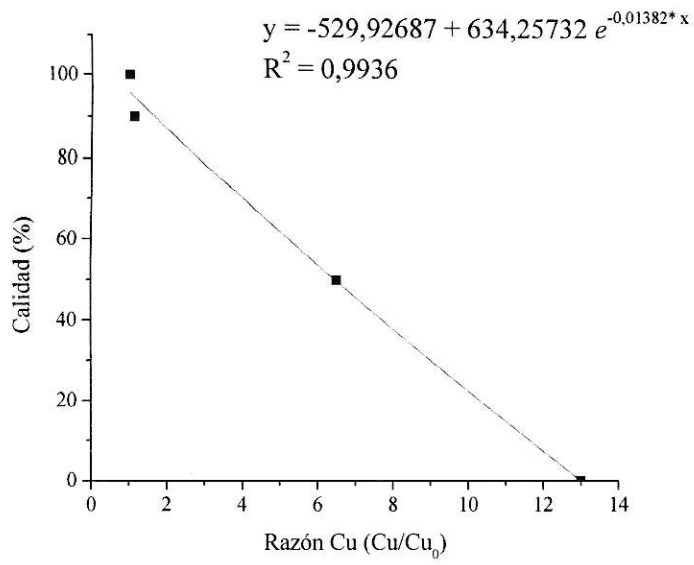


Figura 12: Gráfico calidad de Cu

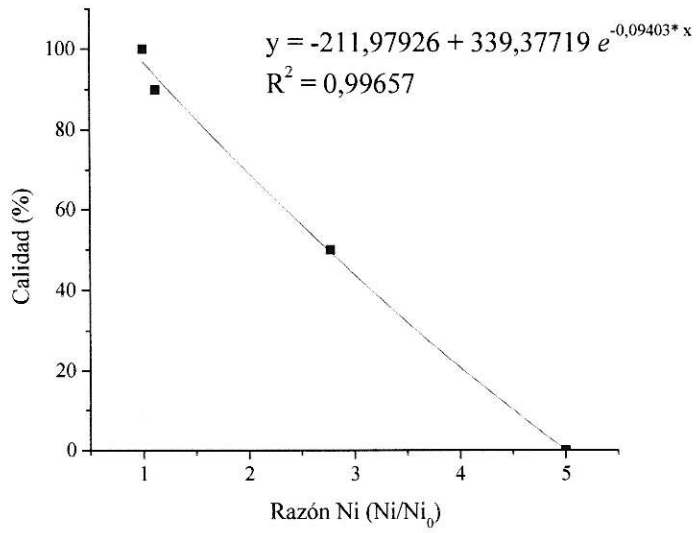


Figura 13: Gráfico calidad de Ni

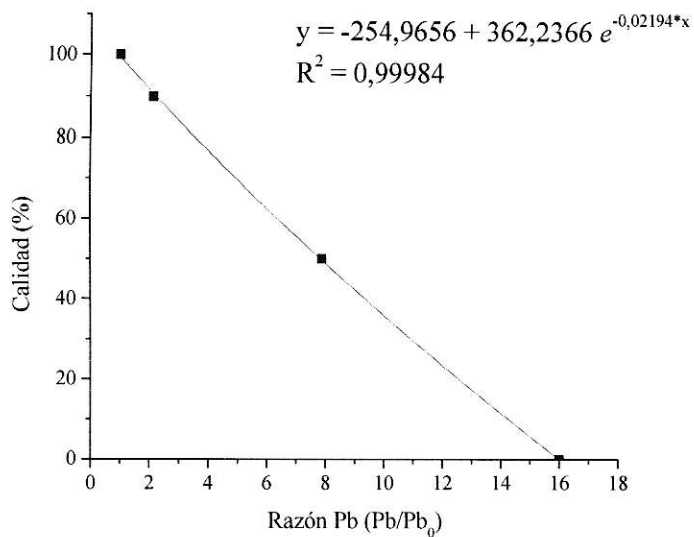


Figura 14: Gráfico calidad de Pb.

Como se puede apreciar en las Figuras 9 a 14, el comportamiento del porcentaje de calidad con respecto a la razón de metal decae exponencialmente de la forma como se expresa en la Ecuación 5; desde 100 a 0% de calidad.

$$y = y_0 + Ae^{R_0 x} \quad \text{Ecuación 5}$$

De este modo, las funciones de calidad de cada metal se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13: Funciones de calidad de metales.

Indicador	Función de calidad
Cd	$\% \text{ Calidad } Cd = -1858,95 + 1960,363 e^{-0,00204 * (\frac{V_{Cd}}{V_{0 \text{ Cd}}})}$
Zn	$\% \text{ Calidad } Zn = 62602356 - 6249017 e^{2,0316 * (\frac{V_{Zn}}{V_{0 \text{ Zn}}})}$
Cr	$\% \text{ Calidad } Cr = -173,46392 + 285,93938 e^{-0,04543 * (\frac{V_{Cr}}{V_{0 \text{ Cr}}})}$
Cu	$\% \text{ Calidad } Cu = -529,92687 + 634,25732 e^{-0,01382 * (\frac{V_{Cu}}{V_{0 \text{ Cu}}})}$
Ni	$\% \text{ Calidad } Ni = -211,97926 + 339,37719 e^{-0,09403 * (\frac{V_{Ni}}{V_{0 \text{ Ni}}})}$
Pb	$\% \text{ Calidad } Pb = -254,9656 + 362,2366 e^{-0,02194 * (\frac{V_{Pb}}{V_{0 \text{ Pb}}})}$

Siendo $\frac{V_M}{V_{0 \text{ M}}}$ la razón entre la concentración del metal determinada experimentalmente

en el sedimento y la concentración base señalada en la Tabla 10.

En las Figuras 15 a 20 se ilustran gráficos de porcentajes de calidad de sedimento para cada uno de los metales, con relación a su función de calidad (Tabla 13) para 26 muestras de sedimentos marinos. En las funciones de calidad se utilizaron los valores bases seleccionados (Tabla 10) y los valores de concentraciones del metal

correspondiente para cada muestra de sedimento marino, valores presentados en el Anexo A 3.

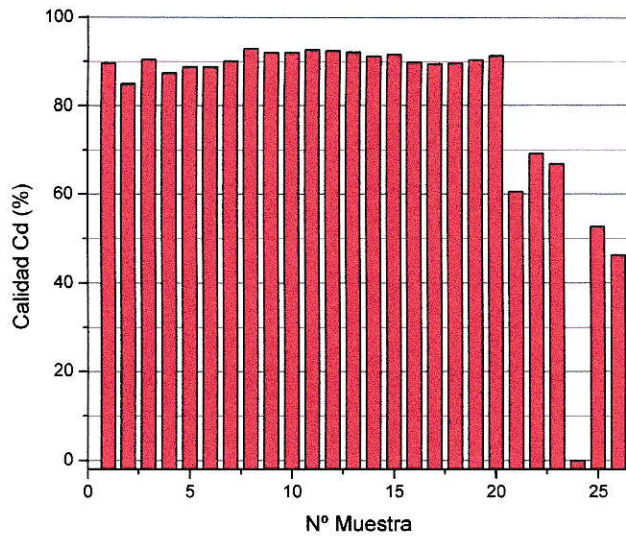


Figura 15: Variación de calidad (%) en 26 muestras de sedimento marino para cadmio.

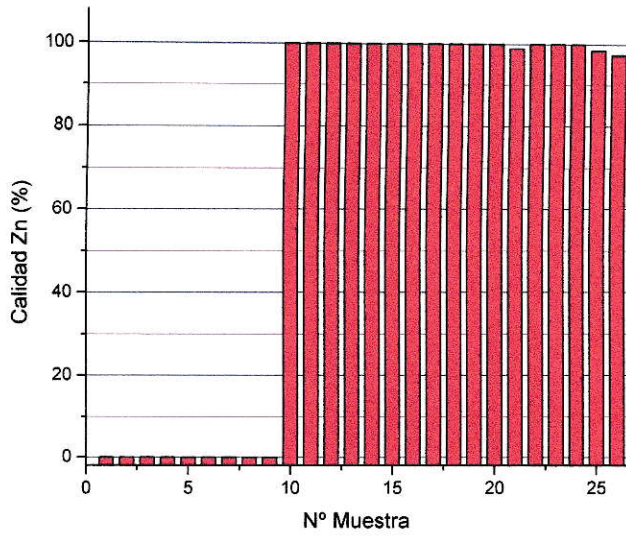


Figura 16: Variación de calidad (%) en 26 muestras de sedimento marino para zinc.

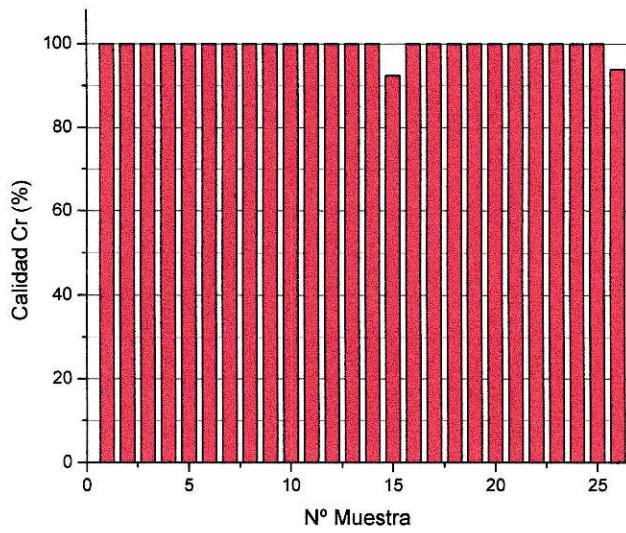


Figura 17: Variación de calidad (%) en 26 muestras de sedimento marino para cromo.

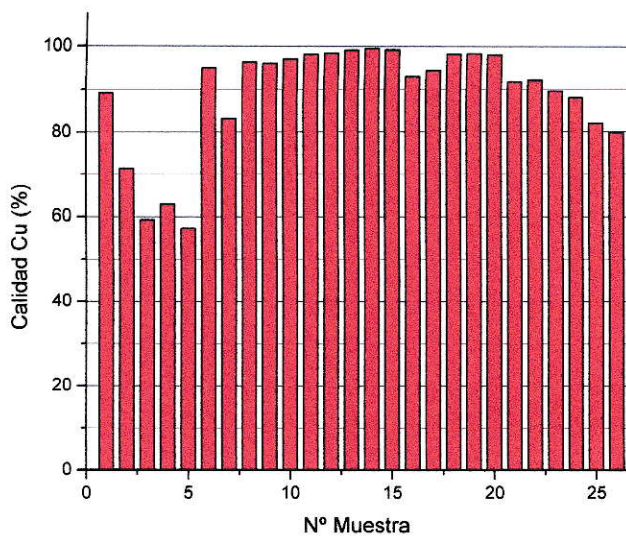


Figura 18: Variación de calidad (%) en 26 muestras de sedimento marino para cobre.

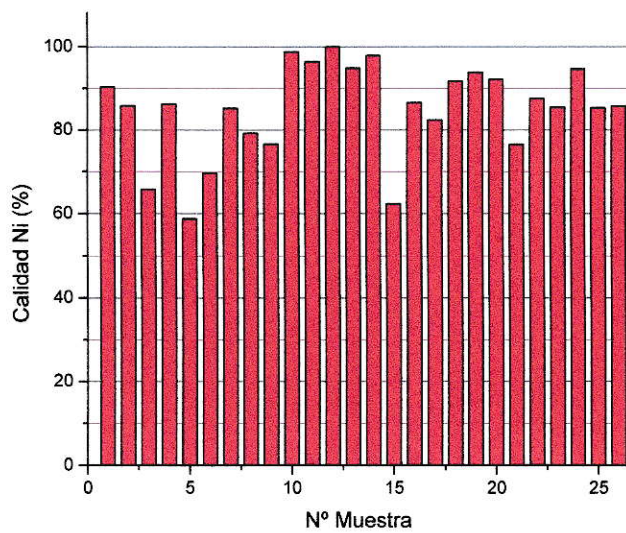


Figura 19: Variación de calidad (%) en 26 muestras de sedimento marino para cadmio.

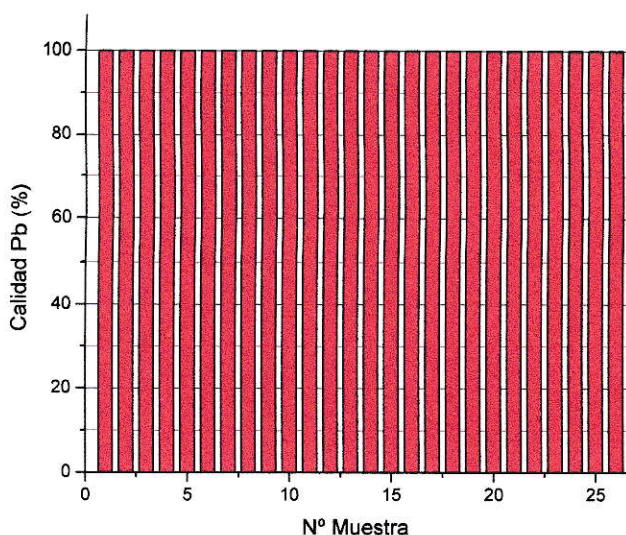


Figura 20: Variación de calidad (%) en 26 muestras de sedimento marino para plomo.

En la Figura 15 se observa una variedad en los % de Calidad del sedimento con respecto al cadmio, una gran porción de muestras se encuentran entre un 90 y 80% de calidad ambiental.

En el caso de la calidad de sedimento marino con respecto al zinc que se ilustra en la Figura 16, se encuentra una polarización en la calidad del sedimento marino; muestras que presentan un 100% de calidad y otras con 0% de calidad para este metal. No se encuentran muestras con calidad intermedia.

Para el cromo todas las muestras analizadas obtuvieron entre un 100 y 90% de calidad de sedimento marino, como se ilustra en la Figura 17.

En la Figura 18 se observa la variabilidad de la calidad de sedimento marino para el metal cobre. Una gran parte de las muestras se encuentran entre el 100 y el 80% de calidad, mientras que una pequeña cantidad de éstas se encuentran entre un 70 y 50% de calidad ambiental para este metal.

La calidad del sedimento marino con respecto al cadmio presentan, como se observa en la Figura 19, una gran variabilidad entre un 100 a 60% de calidad.

En el caso del plomo se encuentra que todas las muestras analizadas presentaron un 100% de calidad, tal como se ilustra en la Figura 20. Por lo tanto no existe contaminación por este metal en las muestras analizadas.

4.1.2 Ponderación

En esta alternativa, se considera que todos los metales tienen igual importancia y por tanto la misma ponderación relativa.

4.1.3 Diseño final y resultado.

La ecuación final del Índice, para la alternativa 1.1 se puede expresar como:

$$\text{Alternativa 1.1} = \sum_i^n \frac{\% \text{ Calidad}}{n} \quad \text{Ecuación 6}$$

Escala

$100 \leq \text{Alternativa 1.1} < 90$	No hay contaminación metálica en los sedimentos marinos.
$90 \leq \text{Alternativa 1.1} < 50$	Contaminación moderada de metales en sedimentos marinos.
$50 \leq \text{Alternativa 1.1} < 0$	Contaminación alta de metales en sedimentos marinos

Resultado

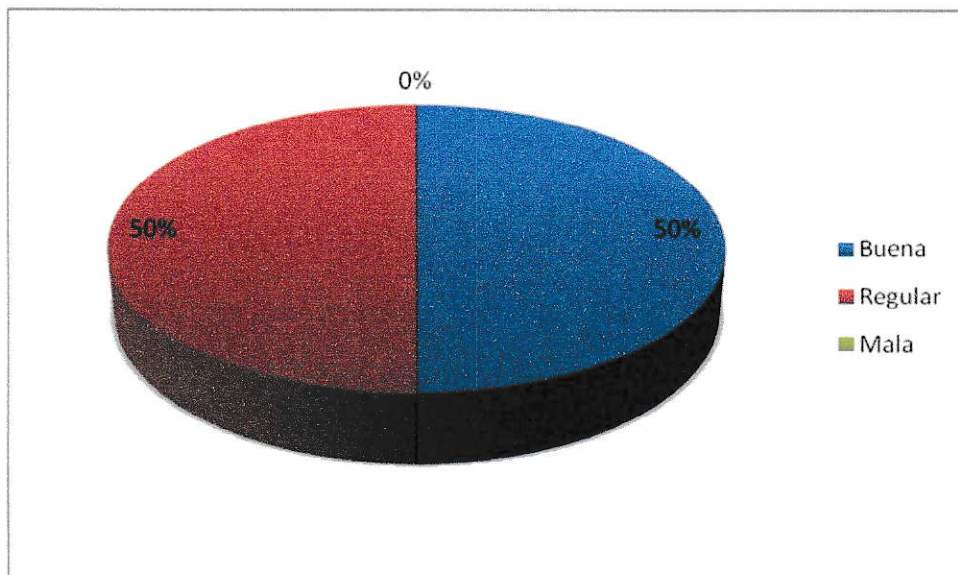


Figura 21: Gráfico Alternativa 1.1

Se aplicó la Ecuación 5 (Alternativa 1.1 de índice) a los porcentajes de calidad para cada una de las 26 muestras analizadas, los que fueron obtenidos con la aplicación de las funciones descritas en la Tabla 13 (porcentajes ilustrados en las Figuras 15 a 20); en la ecuación 5 se agregan los 6 metales analizados para el índice.

Al ser aplicada la ecuación 5 se obtuvieron valores entre 100 y 0; al utilizar la escala del índice descrita anteriormente se obtienen resultados graficados en la Figura 21, donde se observa que un 50% de las muestras de sedimento marino analizadas están libres de contaminación metálica, mientras que el restante 50% de las muestras poseen contaminación moderada de metales en esta matriz ambiental.

4.2. Alternativa 1.2

4.2.1. Selección de funciones de calidad

Para la selección y desarrollo de las funciones de calidad para la Alternativa de índice 1.2 se realizaron los mismos pasos que en el epígrafe 4.1.1, utilizando los mismos datos de valores bases y límites.

4.2.2. Ponderación

Se pretende obtener diferentes pesos para cada metal en el índice. Se utilizó el análisis de componentes principales, con esto se supone que los metales son responsables del efecto observado; los cuales actúan independientemente.

4.2.2.1. Obtención de pesos de Componentes.

Al introducir los datos en el programa Satatgraphics Plus 5.1 y seleccionar la opción Método Multivariable, Análisis de factor, tipo de Factorización de Componentes Principales, se obtiene la Tabla 14; donde se observan los autovalores, los que representan un índice de la varianza; los porcentajes de varianza, que indica la variabilidad que representan cada uno de ellos por separado y en la última columna el porcentaje acumulado para cada uno de los 6 componentes.

Tabla 14: Análisis principales componentes

Componente Número	Autovalor	Porcentaje de varianza	Acumulado porcentaje
1	2,10	35,1	35,1
2	1,76	29,4	64,5
3	0,960	16,0	80,5
4	0,656	10,9	91,4
5	0,346	5,78	97,2
6	0,168	2,80	100

En la Figura 22 se ilustra un gráfico de sedimentación, en éste se observa que se extraen los 2 primeros componentes principales para el análisis, ya que son éstos los que tienen autovalor mayor o igual a 1, siguiendo el test de autovalor 1 o también llamado criterio de Kaiser . En la Tabla 14 se destacan los dos primeros componentes tienen autovalor mayor o igual a 1 y que juntos explican el 64,5 % de la variabilidad de los datos.

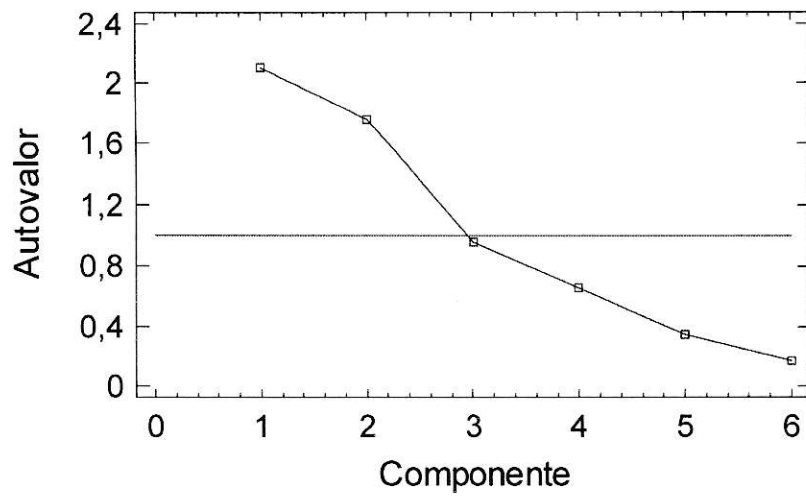


Figura 22: Gráfico de sedimentación

4.2.2.2 Selección de componentes

En la Tabla 15 se presentan los pesos de los componentes principales extraídos en el análisis tras su rotación “varimax”, los valores se estandarizaron sustrayendo sus medias y dividiéndolos por sus desviaciones típicas.

Tabla 15: Pesos de los principales factores después de rotación varimax.

Metales	Factor 1	Factor 2
Cd	-0,0229	0,864
Cr	0,592	0,277
Cu	0,772	0,156
Ni	0,850	-0,162
Pb	0,293	0,890
Zn	0,483	-0,463

Las expresiones que representan los dos principales componentes extraídos se indican en las Ecuaciones 7 y 8.

$$PC1 = -0,0228961 \cdot Cd + 0,592241 \cdot Cr + 0,771825 \cdot Cu + 0,850225 \cdot Ni + 0,293402 \cdot Pb + 0,482644 \cdot Zn$$

Ecuación 7

$$PC2 = 0,863917 \cdot Cd + 0,277086 \cdot Cr + 0,15597 \cdot Cu - 0,162098 \cdot Ni + 0,889485 \cdot Pb - 0,462772 \cdot Zn$$

Ecuación 8

Los pesos significativamente más altos (en peso absoluto) de los PC extraídos se destacan en la Tabla 15; para cinco de los seis metales la diferencia de peso fue grande, en cambio para el zinc no lo es tanto, de igual modo este metal fue relacionado con PC1. De esta manera los 6 metales que se analizaron se agrupan en dos grupos, tal como se presenta en la Tabla 16.

Tabla 16: Agrupación de metales

Grupo 1	Grupo 2
Cr	Cd
Cu	Pb
Ni	
Zn	

Se encuentra que PC1 combina las concentraciones de los metales Cr, Cu , Ni y Zn y PC2 las concentraciones de Cd, y Pb.

La Figura 23 presenta los valores de los dos componentes principales. Cada punto representa una muestra de sedimento, en total 26.

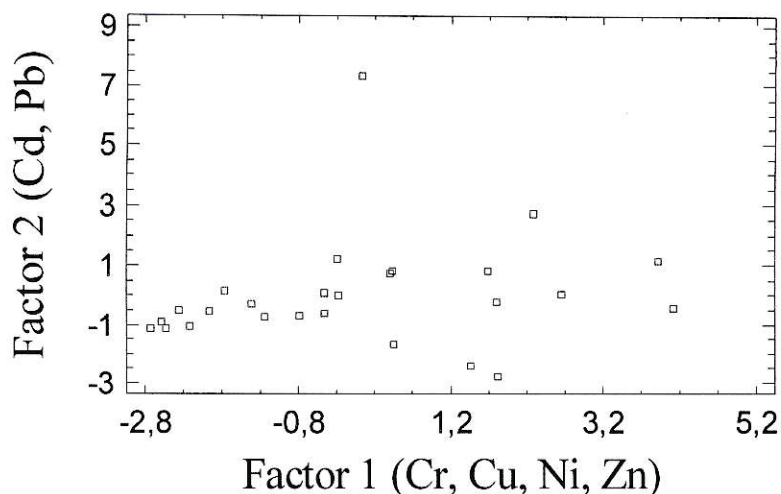


Figura 23: Diagrama de dispersión

En el eje donde se agrupan los metales Cr, Cu , Ni y Zn, es decir en el PC1 se observa que las muestras están dispuestas de manera homogénea a lo largo del eje, lo que indica que se encuentran muestras de sedimento con una significativa concentración de estos metales y otras donde la concentración no lo es tanto. En cambio para PC2 se presentan la mayoría de las muestras cercanas o menores a la unidad, lo que indica que las concentraciones de Cd y Pb en las muestras de sedimento marino son menores, sólo se observa una muestra que se sitúa en el sector positivo del eje de PC2.

En la Figura 24 se ilustra los pesos para PC1 y PC2, en el gráfico hay un punto por cada metal. Las líneas de referencia trazaron en 0,0 de cada dimensión, si un peso es próximo a 0,0 indica que el metal posee una pequeña contribución al componente.

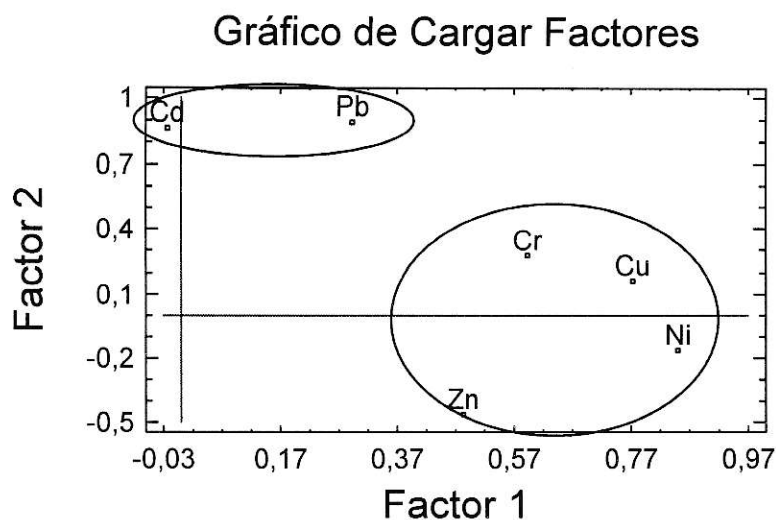


Figura 24. Gráfico de pesos de los componentes principales.

Se observa en la Figura 24 que se asocian los metales de igual manera que en la Tabla 16, en 2 grupos; por una parte se tiene Cr, Cu, Ni y Zn metales que poseen mayor sensibilidad a los cambios redox de la matriz y también esenciales tanto para plantas y/o vegetales presentes en los sedimentos marinos. Por otra parte se agrupan el Cd y Pb, los cuales no son tan sensibles a cambios redox y son metales no esenciales para la vida acuática.

4.2.3 Diseño final y resultados.

La ecuación general del índice se expresa en la Ecuación 9.

$$\text{Alternativa 1.2} = \sum_i^n Vp_i \cdot F_i \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

Vp_i = Raíz cuadrada de valor propio

F_i = Valor del componente

(Colarte & Becerra, 2003)

Al integrar los resultados presentados en las Tablas 14, 15 y 16; se obtiene la Ecuación 10, por lo que el índice final para la Alternativa 1.2 es la siguiente:

Ecuación final del Índice:

$$\text{Alternativa 1.2} = \frac{\left[\sqrt{2,10742} \cdot (\%Cr + \%Cu + \%Ni + \%Zn) \right] + \left[\sqrt{1,76056} \cdot (\%Cd + \%Pb) \right]}{100}$$

Ecuación 10

Escala

$84,6 \leq \text{Alternativa 1.2} < 76,1$ No hay contaminación metálica en los sedimentos marinos.

$76,1 \leq \text{Alternativa 1.2} < 42,3$ Contaminación moderada de metales en sedimentos marinos.

$42,3 \leq \text{Alternativa 1.2} < 0$ Contaminación alta de metales en sedimentos marinos.

Resultados

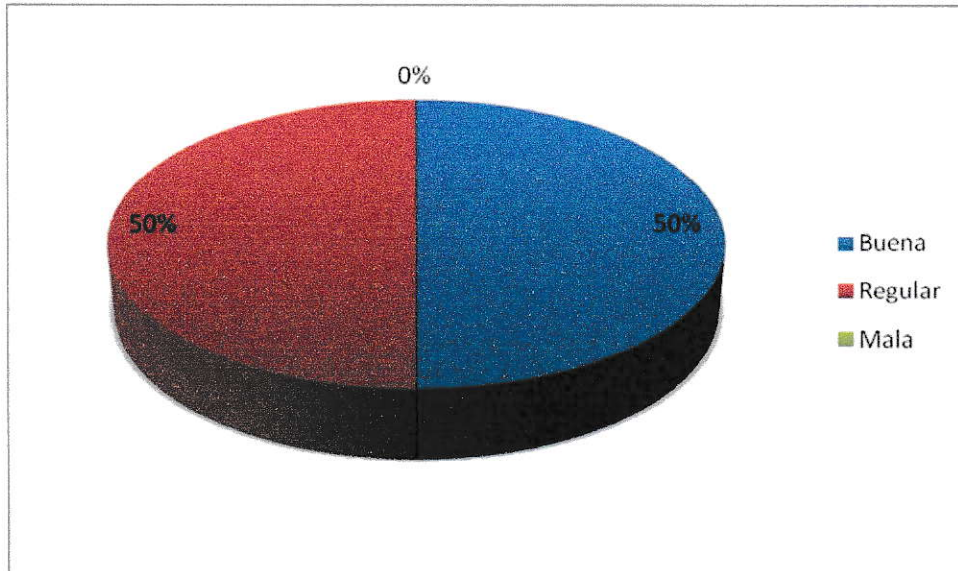


Figura 25: Gráfico resultado Alternativa 1.2

Se aplicó la Ecuación 9 (Alternativa 1.2 de índice) a los porcentajes de calidad para cada una de las 26 muestras analizadas.

Al ser aplicada la Ecuación 9 se obtuvieron valores entre 84,6 y 0; al utilizar la escala del índice descrita anteriormente se obtienen resultados graficados en la Figura 25, donde se observa que un 50% de las muestras de sedimento marino analizadas están libres de contaminación metálica, presentando una condición buena; mientras que el restante 50% de las muestras poseen contaminación moderada de metales en esta matriz ambiental, con una condición ambiental regular.

4.3 Alternativa 2.1

4.3.1. Selección de valores bases para razones.

Los datos de los valores bases de cada metal son los señalados en el epígrafe 4.1.1.1, presentados en la Tabla 10.

4.3.2 Ponderación

En esta alternativa, se considera que todos los metales tienen igual importancia y por tanto la misma ponderación relativa.

4.3.3 Diseño final y Resultados

Ecuación final del Índice:

$$\text{Alternativa } 2.1 = \sum_i^n \frac{R_i}{n} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

n es el número de indicadores, metales.

R_i son las razones obtenidas con valores bases y concentraciones de cada metal obtenidas experimentalmente.

Escala:

Alternativa $2.1 \leq 1$ No hay contaminación metálica en los sedimentos marinos.

$1 < \text{Alternativa } 2.1 \leq 2$ Contaminación moderada de metales en sedimentos marinos.

Alternativa $2.1 > 2$ Contaminación alta de metales en sedimentos marinos.

Los valores utilizados para la construcción de la escala fueron dos:

- 1 cuando la concentración de la muestra es igual o menor a la concentración base, es decir no hay contaminación por metales.
- 2 cuando la concentración de metales en la muestra de sedimento supera un 100% el valor de la concentración base.

Resultado

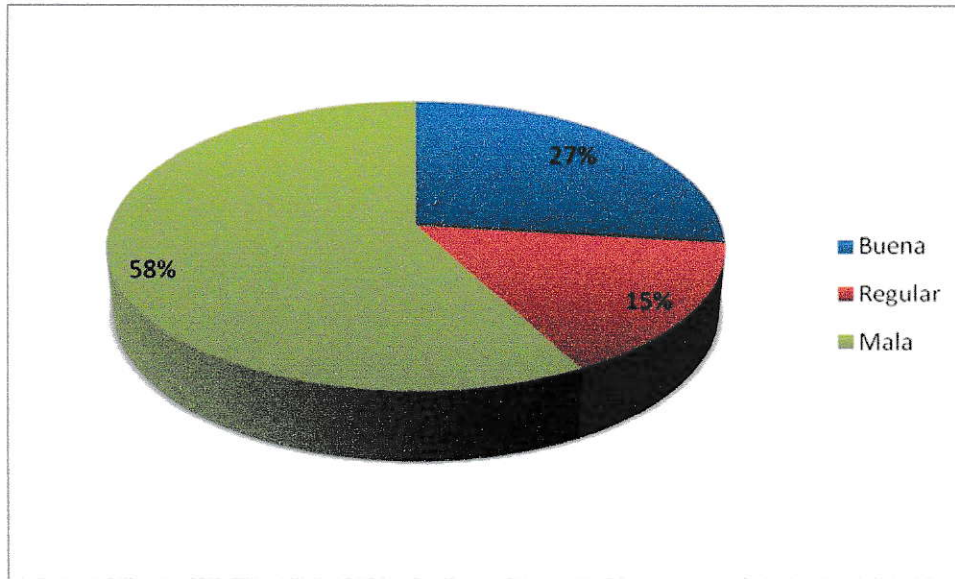


Figura 26: Gráfico resultado Alternativa 2.1

Al aplicar la Ecuación 10, se obtienen resultados de calidad de sedimentos marinos libres de contaminación metálica, de contaminación moderada y de alta contaminación de metales en esta matriz ambiental; siendo esta última categoría la que más peso tiene en los resultados, un 58% del total de las muestras analizadas.

4.4 Alternativa 2.2

4.4.1. Selección de valores base para razones.

Los datos de los valores bases de cada metal son los señalados en el epígrafe 4.1.1.1, los presentados en la Tabla 10.

4.4.2 Ponderación

La ponderación de cada metal en el índice son los presentados en el epígrafe 4.2.2, en la Tabla 15

4.4.3 Diseño final y Resultados

Ecuación general del índice

$$\text{Alternativa 2.2} = \sum_i^n Vp_i \cdot F_i \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

Vp_i = Raíz cuadrada de valor propio

F_i = Valor del componente

(Colarte & Becerra, 2003)

Ecuación final del Índice::

$$\text{Alternativa } 1.2 = \frac{\left[\sqrt{2,10742} \cdot (R_{Cr} + R_{Cu} + R_{Ni} + R_{Zn}) \right] + \left[\sqrt{1,76056} \cdot (R_{Cd} + R_{Pb}) \right]}{100}$$

Ecuación 13

Donde R es la razón entre el valor base y la concentración de cada metal obtenidas experimentalmente.

Escala:

Alternativa 2.2 $\leq 0,8$ No hay contaminación metálica en los sedimentos marinos.

$0,8 < \text{Alternativa 2.2} \leq 1,7$ Contaminación moderada de metales en sedimentos marinos.

Alternativa 2.2 $> 1,7$ Contaminación alta de metales en sedimentos marinos.

Resultado:

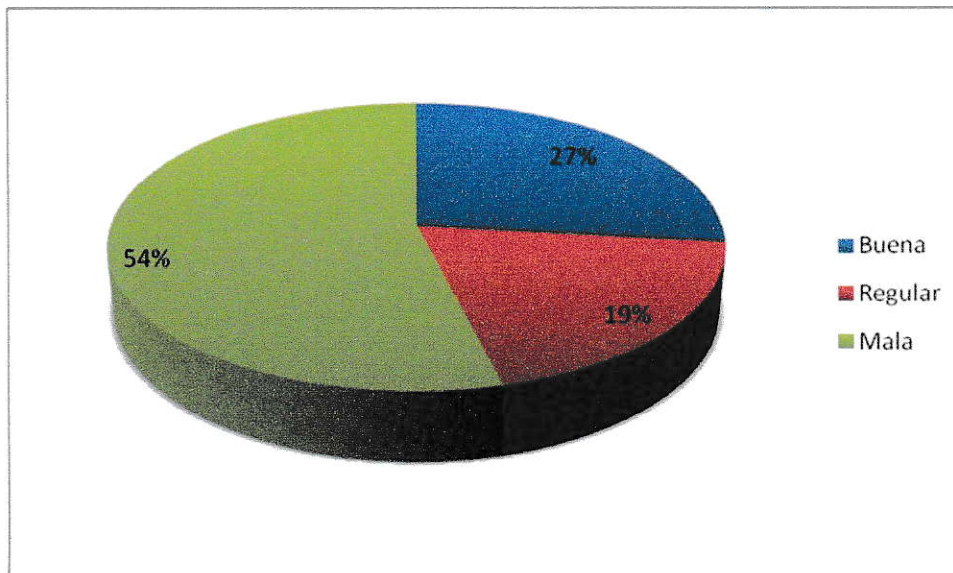


Figura 27: Gráfico resultado Alternativa 2.2

Al utilizar la escala del índice descrita anteriormente se obtienen resultados graficados en la Figura 27, donde se observa que un 27% de las muestras de sedimento marino analizadas están libres de contaminación metálica, presentando una condición buena; mientras que un 54% de las muestras poseen alta contaminación de metales en esta matriz ambiental, finalmente un 19% de las muestras presentan una condición ambiental regular.

4.5 Comparación general y propuesta final.

4.5.1 Comparación de alternativas.

Los valores para las 26 muestras estudiadas con las 4 alternativas de índice, se recogen en el Anexo D.

En la Tabla 17 se entregan ventajas y desventajas de cada una de las alternativas desarrolladas para el índice.

Tabla 17: Ventajas y desventajas de alternativas de índices

	Ventajas	Desventajas
Alternativa 1.1	<ul style="list-style-type: none">• Funciones	<ul style="list-style-type: none">• Concentraciones límites de las diferentes guías de calidad.• Sin ponderación
Alternativa 1.2	<ul style="list-style-type: none">• Funciones• Diferentes ponderaciones para indicadores	<ul style="list-style-type: none">• Concentraciones límites• Sólo se puede utilizar para los indicadores seleccionados, cambian las ponderaciones
Alternativa 2.1	<ul style="list-style-type: none">• Simple elaboración	<ul style="list-style-type: none">• Sin ponderación
Alternativa 2.2	<ul style="list-style-type: none">• Utilización valor base• Simple elaboración• Distintas ponderaciones para indicadores	<ul style="list-style-type: none">• Sólo se puede utilizar para los indicadores seleccionados, cambian las ponderaciones

Al utilizar funciones de calidad se trabaja con comportamientos reales que tienen los metales en la matriz ambiental, ya que para su creación se utilizan concentraciones reportadas en bibliografía que causan distintos grados de efectos en la vida acuática. La selección de estos valores se basaron en tres guías de calidad de sedimentos marino para

la vida acuática (Tabla 6) las que son aplicables a zonas geográficas específicas, por lo que la selección y posterior utilización de éstas para la zona sur de Chile es complejo.

Para las alternativas de índice donde se utilizaron distintos pesos para los indicadores, la incorporación de otro metal es imposible, ya que se tendría que realizar nuevamente un estudio estadístico (PC) para obtener los nuevos pesos de los indicadores.

En el marco del Proyecto INNOVA CHILE-05CN11IPM-25, se desarrolló un índice de condición de fondo (ICF) para sedimentos marinos en la misma zona de estudio. La escala de este índice es la que se indica a continuación

IC 80-100 condición de fondo óptimo.
IC 50-79,9 condición de fondo regular.
IC 0-49,9 condición de fondo deficiente.

Los resultados observados al aplicar este índice a las 26 muestras estudiadas se ilustran en la Figura 28; donde un 35% de éstas presentan una condición deficiente, un 65% una condición regular y ninguna muestra posee un estado óptimo de la condición de fondo. Los valores del ICF para cada muestra se presentan en el anexo D.

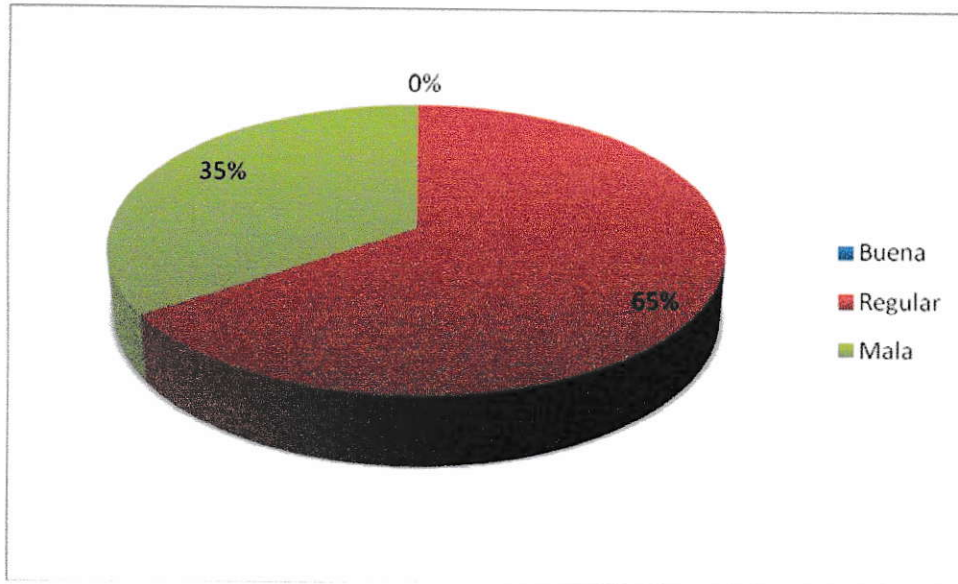


Figura 28: Gráfico resultado con ICF.

Dentro de las muestras analizadas se incluyeron muestras de referencia, éstas debieran obtener la mejor condición, es decir buena, libre de contaminación por metales; en la Tabla 18 se entregan los resultados obtenidos para estas muestras para las distintas alternativas de índice como también para el ICF desarrollado anteriormente.

Tabla 18: Condición de contaminación para muestras de referencias

Muestra	Condición alternativa 1.1	Condición alternativa 1.2	Condición alternativa 2.1	Condición alternativa 2.2	Condición ICF
6	Regular	Regular	Mala	Mala	Regular
7	Regular	Regular	Mala	Mala	Regular
8	Regular	Regular	Mala	Mala	Regular
19	Buena	Buena	Buena	Buena	Regular
20	Buena	Buena	Buena	Buena	Regular
21	Regular	Regular	Mala	Mala	Regular

En la Tabla se observa que ninguna de las alternativas de índices de contaminación dieron como resultado una condición buena para las seis muestras de referencia.

Las alternativas de índices que mejores resultados se obtuvieron fueron las 1.1 y 1.2, las desarrolladas con funciones de calidad, en éstas se alcanzaron condiciones regulares y buenas para las muestras de referencia. Con la utilización del ICF todas las muestras de referencia obtuvieron una condición regular.

Esos resultados pueden deberse a que los puntos donde fueron recolectadas no estaban totalmente libres de contaminación, por lo que no obtendrían una condición buena con la aplicación de ningún índice; por otro lado puede suceder que los índices desarrollados

no consideran valores bases representativos de la zona estudiada (Región de Los Lagos), es decir que para la construcción de éstos se tomaron valores bases correspondientes a otras áreas geográficas; lo cual puede distorsionar la interpretación.

4.5.2 Evaluación de resultados y su interpretación ambiental.

Las condiciones ambientales presentadas en los índices fueron las siguientes:

- Buena: Libre de contaminación por metales en sedimentos marinos.
Se puede seguir utilizando la zona geográfica como reservorio de contaminantes metálicos.
- Regular: Contaminación moderada por metales en sedimentos marinos.
Se puede seguir utilizando la zona geográfica como reservorio de contaminantes metálicos pero de forma controlada. Se deben realizar periódicos controles de contaminación.
- Mala: Alta contaminación por metales en sedimentos marinos.
No se puede utilizar la zona geográfica como reservorio de contaminantes metálicos. No se permiten descargas ni actividades que aporten metales.

En la Tabla 19 se tienen las diferentes condiciones ambientales de contaminación por metales para sedimentos marinos con las 4 alternativas de índices presentados en los apartados anteriores.

Tabla 19: Comparación distintas condiciones % de alternativas de índices.

	Condición %		
	Buena	Regular	Mala
Alternativa 1.1	50	50	0
Alternativa 1.2	50	50	0
Alternativa 2.1	27	15	58
Alternativa 2.2	27	19	54

Para las dos primeras alternativas (1.1 y 1.2) se obtienen los mismos resultados obteniendo ninguna muestra catalogada como mala (50% buena y 50% regular), por lo que se puede estimar que la utilización de métodos estadísticos como el de los principales componentes, donde se les otorgaron distintos pesos a los metales agrupados en 2 grupos, da las mismas respuestas que el uso de iguales pesos para cada metal (1/6 para cada uno). Al estudiar los resultados obtenidos con la utilización de las alternativas 2.1 y 2.2 se llegan a respuestas muy similares.

Entre la utilización de funciones de calidad y la de razones entre valor base y valor de concentración experimental, las respuestas son distintas. En primer lugar el uso de

funciones de calidad (alternativas 1.1 y 1.2) no muestra resultados de condición mala para sedimentos marinos, en cambio al utilizar sólo razones (alternativas 2.1 y 2.2) los resultados para esta condición son cercanos al 55% de las muestras de sedimento marino; éste es uno de los resultados más distintos obtenidos.

V CONCLUSIONES

Se formularon funciones correspondientes a la calidad ambiental de sedimentos marinos para los metales Cd, Cu, Cr, Ni, Pb y Zn, considerando valores de concentración de distintas Guías de Calidad y valores bases. Todas las funciones evidenciaron un decaimiento exponencial en la calidad del sedimento a medida que aumenta la concentración del metal en el mismo.

Se compararon las evaluaciones ambientales obtenidas con y sin ponderación entre los metales, no evidenciando diferencias en el comportamiento, lo que indica que los metales considerados son igualmente importantes entre sí.

La evaluación de sitios supuestamente limpios (de referencia) evidenció discrepancias entre las distintas alternativas lo que pudiera estar relacionado con una selección incorrecta del sitio control.

Se evaluaron las alternativas desarrolladas y se concluye que la alternativa denominada como 1.1 es la más recomendable para su aplicación futura. Esto se basa en:

- No se obtuvieron resultados diferentes en las variantes con y sin ponderación. O sea, la ponderación no evidencia un comportamiento diferente entre los metales.
- El uso directo de valores bases provenientes de zonas geográficas diferentes puede distorsionar la interpretación de los resultados.

- Las funciones de calidad permiten normalizar la relación entre la concentración de metales y el estado general del sedimento.

VI REFERENCIAS

- Abraira V., Pérez de Vargas A. 1996. Métodos Multivariantes en Bioestadística. Madrid. Centro de Estudios Ramón Areces. pp 397-436.
- Acosta, C. Londeiros. 2004. Efecto del cobre en juveniles de bivalvos (*tivela mactroides*) provenientes de ambientes con diferentes niveles de contaminación. Bol. Centro Investigaciones Biológicas: 41-50.
- Adriano, D.C. 2001. Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals. 2° Edición. Springer. Pp 846.
- Agemian H., Chau A.S.Y. 1976. Evaluation of extraction techniques for the determination of metals in aquatic sediments. The Analyst 101, 761-767.
- Ahumada R, Rudolph A, Aguirre G, Moscoso J y Silva N.. 2007. Ecotoxicological quality in sediments of Reloncaví and Corcovado gulfs, Chile. Investigaciones Marinas, 35 (2): 53-61.
- Ahumada R. , Rudolph A., y Contreras S. 2002. Contenido de metales (Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Sr, V y Zn) en sedimentos de los fiordos patagónicos (52° - 56° S), Chile. Cienc. Tecnol. Mar, 25 (2): 77-86.
- Ahumada, R., González Y E., Neira, J. 2004. Especiación de zinc en sedimentos marinos del fiordo Aysén. Investigaciones Marinas, Valparaíso, 32(1): 3-10
- Ahumada, Rudolph and S.M. Mudge. 2008. Trace metals in sediments of Southeast Pacific Fjords, north region (42,5° to 46,5° S), J. Environ. Monit., 10: 231 – 238.
- ANZECC & ARMCANZ. 2000. Australian and New Zealand Guidelines for Fresh and Marine Water Quality - The Guidelines - Volume 1 - Chapter 3.
- Berrios V, Acosta E. 2006, Red de monitoreo de calidad del aire de la región Metropolitana: conformación y principales funciones de los integrantes del equipo de trabajo. Disponible en http://www.conama.cl/rm/568/articles-41184_CmmAnexo11.pdf. Consultado 15 Diciembre 2008.
- Caeiro S, Costa M, Ramos T, Fernandes F, Silveira N, Coimbra A, Medeiros G, y Painho M. 2005. Assessing heavy metal contamination in Sado Estuary sediment: An index análisis approach. Ecological indicators 5 151-169.
- Canadian Council of Ministers of the Environment 1995CCME EPC-98E
- Carmona, N. Cortés. 2006. Elaboración de Modelos Descriptivos y generales de los Impactos Ambientales producidos Por las Pinturas Anticrustantes en la actividad salmonera.
- Cenma

CENMA, 2008. Antecedentes Generales Para Un Índice De Condición De Fondo Para La Acuicultura”, Dra Isel Cortés Nodarse, Enero-2008.

Chile transparente, instrumentos de medición, índice de percepción de Corrupción.2005. Disponible en Web: <http://www.chiletransparente.cl/home/ipc.html>. Consultado 7 Noviembre 2008.

Colarte T, Becerra M. 2003. Características subyacentes en el desarrollo socioeconómico de la provincia Cienfuegos durante el período 1987-2000. Economía y Desarrollo. 133. 189-217.

CONAMA. 2006. Plan de Gestión de episodios críticos. Disponible en Web: http://www.conama.cl/rm/568/article-34639.html#h2_1. Consultado 15 Diciembre 2008.

Constitución Política de la República de Chile. Diario Oficial de la República de Chile, 24 de octubre de 1980.

Contaminación de aguas marinas, Conserjería de medio ambiente de la Junta de Andalucía. Disponible en http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/web/menuitem.a5664a214f73c3df81d8899661525ea0/?vgnnextoid=cfaeb44325234010VgnVCM1000000624e50aRCRD&vgnnextchannel=3259b19c7acf2010VgnVCM1000001625e50aRCRD&lr=lang_es. Consultado 1 Febrero 2009

Dale, S. Beyeler.2001. Challenges in the development and use of ecological indicators. Ecological Indicators, 1, p.: 3-10.

DIRECTEMAR, 2004. Calidad ambiental de los cuerpos marinos y continentales controlados en el marco del programa de observación del ambiente litoral (P.O.A.L.). Disponible en [http://www.directemar.cl/spmaa/Medio%20Ambiente%20\(Internet\)/download/Pol/Corpos_de_Agua_y_Metodolog%20A%20Analizadas_en_POAL.pdf](http://www.directemar.cl/spmaa/Medio%20Ambiente%20(Internet)/download/Pol/Corpos_de_Agua_y_Metodolog%20A%20Analizadas_en_POAL.pdf). Consultado 20 Noviembre 2008.

Eaton A., Clesceri L., Rice E and Greenberg A. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, Edición 21. AWWA - American Water Works Association. 2005.Sección 3030 y 3120.

Estévez J. 2007. Sistema de indicadores para el diagnóstico y seguimiento de la Educación Superior en México. 2007. ANUIES. Pp 55-70.

Fernández et. Al. 2006. Contaminación y Toxicidad de sedimentos afectados por el vertimiento del Prestige y sus efectos sobre el desarrollo embrionario del erizo de mar, Cien. Marinas, Vol 32 (2B): 421-427.

Forrest B, Keeley N, Gillespie P, Hopkins G, Knight B, Govier D. 2007. Review of the ecological effects of marine finfish aquaculture: final report. Prepared for Ministry of Fisheries. New Zealand. Cawthron Report No. 1285. 71p

García-Rico, L., Soto, M., Jara, M Y Gómez, A. 2004. Fracciones geoquímicas de Cd, Cu y Pb en sedimentos costeros superficiales de zonas ostrícolas del estado de sonora, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 20, 4.

Geoffrey R. Norman, John E. De Burgh Norman, David L. Streiner. *Bioestadística* 1996. Elsevier España. Pp 134.

Gonzalez-Lozano, María Cristina, Mendez-Rodriguez, Lía C, Lopez-Veneroni, Diego G y col. 2006. Evaluación de la contaminación en sedimentos del área portuaria y zona costera de salina cruz, oaxaca, México. *INCI, sep. vol.31, no.9:647-656*.

INDUAMBIENTE.COM, 2007. La propuesta MACAM III. Disponible en: http://www.induambiente.com/index.php?option=com_content&task=view&id=32&Itemid=53. Consultado 15 Diciembre 2008.

INPESCA. Bioensayo de toxicidad aguda y crónica con especies marinas de la costa chilena, centro de estudios y gestión ambiental, instituto de investigación pesquera. Disponible en Web: <http://www.inpesca.cl/Medio%20Ambiente/Publicaciones/Bio-sp.pdf>. Consultado 20 Noviembre 2008.

Jiménez, J., Gelabert, R. Y Brito, R. 2006. Efectos tóxicos del níquel y el zinc en *Artemia franciscana* (Crustácea: Branchiópoda: Anostraca). *Universidad y Ciencia*. 22, 1.

Ley N° 19.300, Ley sobre bases generales del medio ambiente. *Diario Oficial de la República de Chile*, 9 de marzo de 1994.

Lomeli Ma G, Ilarraza A. Pagina web: http://www.sagan-gea.org/hojared_AGUA/paginas/15agua.html UNAM, Mexico. Consultado 1 febrero 2009

Manahan S., 2007. *Introducción a la química ambiental*. 1° Edición. Barcelona. Pp 75-95.

Marín-Guirao L, Cesar A, Marín A, Vita R. Contaminación por metales en los sedimentos del Mar Menor (SE de España). *Cien. Marinas*, 2005, Vol 31, No.2: 413-428

OECD. 1993. OECD core set of indicators for environmental performance reviews. Organisation for economic co-operation and development. *Environment monographs* N° 83

Pazos P., 2008. Biodisponibilidad de cromo en sedimentos marinos de la ría de Arousa. 1° Edición, pp 14-19.

Pilar Diana Amat Infante y col.2002. Estudio de la Contaminación por metales pesados en sedimentos y ostiones de la bahía de Manzanillo, Cuba. *Revista de la sociedad química de México*. Vol 46, No 4: 357-361

PNUD. El Desarrollo Humano... ¿qué es?. Disponible en Web: <http://www.desarrollohumano.cl/idhc/wwwroot/quefr.htm>. Consultado 20 Diciembre 2008.

PNUMA. 2001. Informe sobre los Indicadores Ambientales y de la Sustentabilidad en América Latina y el Caribe, XIII Reunión del Foro de Ministros de Medio Ambiente de América Latina y el Caribe, Río de Janeiro, Brasil.

Ponce, R., Forja, J.M.Y Gómez, A. 2000. Influencia de la actividad antropogénica en la distribución vertical de Zn, Cd, Pb, y Cu en agua intersticial y sedimentos marino costeros (Bahía de Cádiz, SW de España). *Ciencias Marinas*. 26.3:479-502.

Protocol for the Derivation of Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life

Ramírez M, Massolo S, Frache R, Correa J. 2005. Metal speciation and environmental impact on sandy beaches due to El Salvador copper mine, Chile *Marine Pollution Bulletin* 50: 62–72.

Rodriguez, L. Y Rivera, D. 1995. Efecto del cobre y cadmio en el crecimiento de *Tetraselmis suecica* (Kyllin) Butcher and *Dunaliella salina* TEODORESCO. *Estudios Oceanológicos*. 14:61-74.

Rosas H, Estudio de la contaminación por metales pesados de la cuencas del Llobregat. 2001. UPC. Pp 235-264.

Rubio B, Nombela M y Vilas F. 2000, La Contaminación por metales pesados en las Rías Baixas Gallegas: Nuevos valores de fondo para la Ría de Vigo (NO de España). *Journal of Iberian geology*. Vol 26, pp 121-149.

Scelzo.1997. Toxicidad del cobre en larvas nauplii del camarón comercial *Artemesia longinaris* Bate (Crustacea, Decapoda, Penaeidae). *Investigaciones Marinas* 25: 177-1985.

Shakouri, M. 2003. Impact of cage culture on sediment chemistry a case of study in Mjoifjordour. Final Project. The United Nation University. Fisheries training programme. Fisheries Co. of Iran (SHILAT), 44pp.

Shine J.P, Ika R, Ford T. 1995. Multivariate Statistical Examination of Spatial and temporal Patterns of Heavy Metal Contamination in New Bedford Harbor Marine Sediments.

USACH. Estándares Nacionales De Calidad Ambiental, Sustentabilidad y medio Ambiente. Disponible en <http://web.usach.cl/ima/apendc.htm>. Consultado 15 Noviembre 2008.

VII ANEXOS

Anexo A

Tablas de datos de muestras de sedimento

Anexo A 1 Concentración (mg/L)

Determinación de metales – Método por ICP/OES, Standard Method for the Examination of Water and Wastewater 20th Edition 1998;						
3125 A (código interno ILMAL – 019)						
Muestra	Cd	Zn	Cr	Cu	Ni	Pb
Concentración (mg / L)						
1	$1,23 \cdot 10^{-2}$	$1,36 \cdot 10^{+1}$	$2,33 \cdot 10^{-1}$	$3,80 \cdot 10^{-1}$	$3,00 \cdot 10^{-1}$	$1,50 \cdot 10^{-2}$
2	$1,68 \cdot 10^{-2}$	$1,35 \cdot 10^{+1}$	$2,97 \cdot 10^{-1}$	$8,10 \cdot 10^{-1}$	$3,27 \cdot 10^{-1}$	$1,95 \cdot 10^{-2}$
3	$1,11 \cdot 10^{-2}$	$1,11 \cdot 10^{+1}$	$2,68 \cdot 10^{-1}$	$1,12 \cdot 10^0$	$5,01 \cdot 10^{-1}$	$2,55 \cdot 10^{-2}$
4	$1,43 \cdot 10^{-2}$	$2,37 \cdot 10^{+1}$	$2,06 \cdot 10^{-1}$	$1,02 \cdot 10^0$	$3,23 \cdot 10^{-1}$	$1,27 \cdot 10^{-2}$
5	$1,27 \cdot 10^{-2}$	$1,26 \cdot 10^{+1}$	$2,57 \cdot 10^{-1}$	$1,17 \cdot 10^0$	$5,65 \cdot 10^{-1}$	$8,89 \cdot 10^{-3}$
6	$1,28 \cdot 10^{-2}$	$4,02 \cdot 10^{+1}$	$2,35 \cdot 10^{-1}$	$2,26 \cdot 10^{-1}$	$4,67 \cdot 10^{-1}$	< LD
7	$1,15 \cdot 10^{-2}$	$6,50 \cdot 10^{+1}$	$2,45 \cdot 10^{-1}$	$5,13 \cdot 10^{-1}$	$3,32 \cdot 10^{-1}$	< LD
8	$8,60 \cdot 10^{-3}$	$1,06 \cdot 10^{+1}$	$1,43 \cdot 10^{-1}$	$1,91 \cdot 10^{-1}$	$3,83 \cdot 10^{-1}$	$1,21 \cdot 10^{-2}$
9	$9,50 \cdot 10^{-3}$	$2,07 \cdot 10^{+1}$	$2,72 \cdot 10^{-1}$	$1,98 \cdot 10^{-1}$	$4,05 \cdot 10^{-1}$	< LD
10	$1,02 \cdot 10^{-2}$	$5,50 \cdot 10^{-1}$	$1,63 \cdot 10^{-1}$	$1,88 \cdot 10^{-1}$	$2,37 \cdot 10^{-1}$	$6,90 \cdot 10^{-3}$
11	$8,50 \cdot 10^{-3}$	$3,91 \cdot 10^{-1}$	$1,31 \cdot 10^{-1}$	$1,42 \cdot 10^{-1}$	$2,30 \cdot 10^{-1}$	< LD
12	$9,10 \cdot 10^{-3}$	$4,06 \cdot 10^{-1}$	$1,97 \cdot 10^{-1}$	$1,41 \cdot 10^{-1}$	$1,97 \cdot 10^{-1}$	< LD
13	$9,20 \cdot 10^{-3}$	$4,71 \cdot 10^{-1}$	$1,82 \cdot 10^{-1}$	$1,22 \cdot 10^{-1}$	$2,50 \cdot 10^{-1}$	< LD
14	$9,80 \cdot 10^{-3}$	$3,74 \cdot 10^{-1}$	$1,29 \cdot 10^{-1}$	$1,10 \cdot 10^{-1}$	$2,18 \cdot 10^{-1}$	< LD
15	$9,50 \cdot 10^{-3}$	$4,95 \cdot 10^{-1}$	$5,75 \cdot 10^{-1}$	$1,18 \cdot 10^{-1}$	$5,15 \cdot 10^{-1}$	$6,00 \cdot 10^{-3}$
16	$1,12 \cdot 10^{-2}$	$6,35 \cdot 10^{-1}$	$2,63 \cdot 10^{-1}$	$2,60 \cdot 10^{-1}$	$3,04 \cdot 10^{-1}$	$9,80 \cdot 10^{-3}$
17	$1,10 \cdot 10^{-2}$	$5,90 \cdot 10^{-1}$	$1,85 \cdot 10^{-1}$	$2,21 \cdot 10^{-1}$	$3,28 \cdot 10^{-1}$	$4,30 \cdot 10^{-3}$
18	$1,41 \cdot 10^{-2}$	$6,38 \cdot 10^{-1}$	$2,90 \cdot 10^{-1}$	$1,75 \cdot 10^{-1}$	$3,30 \cdot 10^{-1}$	$8,50 \cdot 10^{-3}$
19	$1,27 \cdot 10^{-2}$	$5,36 \cdot 10^{-1}$	$1,95 \cdot 10^{-1}$	$1,64 \cdot 10^{-1}$	$2,96 \cdot 10^{-1}$	$1,61 \cdot 10^{-2}$
20	$1,27 \cdot 10^{-2}$	$5,35 \cdot 10^{-1}$	$1,82 \cdot 10^{-1}$	$1,89 \cdot 10^{-1}$	$3,43 \cdot 10^{-1}$	$8,90 \cdot 10^{-3}$
21	$4,46 \cdot 10^{-2}$	$8,75 \cdot 10^{-1}$	$2,74 \cdot 10^{-1}$	$3,23 \cdot 10^{-1}$	$4,35 \cdot 10^{-1}$	$1,65 \cdot 10^{-2}$
22	$3,56 \cdot 10^{-2}$	$6,06 \cdot 10^{-1}$	$2,09 \cdot 10^{-1}$	$3,17 \cdot 10^{-1}$	$3,38 \cdot 10^{-1}$	< LD
23	$3,69 \cdot 10^{-2}$	$7,59 \cdot 10^{-1}$	$2,00 \cdot 10^{-1}$	$3,76 \cdot 10^{-1}$	$3,46 \cdot 10^{-1}$	$2,34 \cdot 10^{-2}$
24	$3,59 \cdot 10^{-1}$	$7,50 \cdot 10^{-1}$	$3,02 \cdot 10^{-1}$	$4,32 \cdot 10^{-1}$	$2,78 \cdot 10^{-1}$	$4,59 \cdot 10^{-2}$
25	$4,87 \cdot 10^{-2}$	$8,29 \cdot 10^{-1}$	$2,91 \cdot 10^{-1}$	$5,32 \cdot 10^{-1}$	$3,23 \cdot 10^{-1}$	$1,09 \cdot 10^{-2}$
26	$5,44 \cdot 10^{-2}$	$8,82 \cdot 10^{-1}$	$5,30 \cdot 10^{-1}$	$5,77 \cdot 10^{-1}$	$3,16 \cdot 10^{-1}$	$2,34 \cdot 10^{-2}$
LD_{inst} mg/L	$7,70 \cdot 10^{-4}$	$1,56 \cdot 10^{-3}$	$5,43 \cdot 10^{-3}$	$3,30 \cdot 10^{-3}$	$4,58 \cdot 10^{-3}$	$3,18 \cdot 10^{-3}$

Anexo A 2

Peso (g) de muestras

Muestra	Masa de peso en seco (g)
1	0,3276
2	0,3158
3	0,3200
4	0,3262
5	0,3276
6	0,3101
7	0,2993
8	0,3331
9	0,3147
10	0,3387
11	0,3032
12	0,3150
13	0,3127
14	0,3025
15	0,3055
16	0,2998
17	0,2906
18	0,3750
19	0,3591
20	0,3949
21	0,3376
22	0,3418
23	0,3308
24	0,3462
25	0,3080
26	0,3041

Anexo A 3

Concentración muestras (mg/kg)

Determinación de metales – Método por ICP/OES, Standard Method for the Examination of Water and Wastewater 20th Edition 1998;						
3125 A (código interno ILMAL – 019)						
Muestra	Cd	Zn	Cr	Cu	Ni	Pb
Concentración (mg / Kg)						
1	$9,39 \cdot 10^{-1}$	$1,04 \cdot 10^{+3}$	$1,78 \cdot 10^{+1}$	$2,90 \cdot 10^{+1}$	$2,29 \cdot 10^{+1}$	$1,14 \cdot 10^0$
2	$1,33 \cdot 10^0$	$1,07 \cdot 10^{+3}$	$2,35 \cdot 10^{+1}$	$6,41 \cdot 10^{+1}$	$2,59 \cdot 10^{+1}$	$1,54 \cdot 10^0$
3	$8,79 \cdot 10^{-1}$	$8,82 \cdot 10^{+2}$	$2,12 \cdot 10^{+1}$	$8,87 \cdot 10^{+1}$	$3,97 \cdot 10^{+1}$	$2,02 \cdot 10^0$
4	$1,13 \cdot 10^0$	$1,88 \cdot 10^{+3}$	$1,63 \cdot 10^{+1}$	$8,07 \cdot 10^{+1}$	$2,56 \cdot 10^{+1}$	$1,01 \cdot 10^0$
5	$1,01 \cdot 10^0$	$9,98 \cdot 10^{+2}$	$2,03 \cdot 10^{+1}$	$9,26 \cdot 10^{+1}$	$4,47 \cdot 10^{+1}$	$7,04 \cdot 10^{-1}$
6	$1,01 \cdot 10^0$	$3,18 \cdot 10^{+3}$	$1,86 \cdot 10^{+1}$	$1,79 \cdot 10^{+1}$	$3,70 \cdot 10^{+1}$	< LD
7	$9,10 \cdot 10^{-1}$	$5,14 \cdot 10^{+3}$	$1,94 \cdot 10^{+1}$	$4,06 \cdot 10^{+1}$	$2,63 \cdot 10^{+1}$	< LD
8	$6,81 \cdot 10^{-1}$	$8,37 \cdot 10^{+2}$	$1,13 \cdot 10^{+1}$	$1,51 \cdot 10^{+1}$	$3,03 \cdot 10^{+1}$	$9,58 \cdot 10^{-1}$
9	$7,55 \cdot 10^{-1}$	$1,64 \cdot 10^{+3}$	$2,16 \cdot 10^{+1}$	$1,57 \cdot 10^{+1}$	$3,22 \cdot 10^{+1}$	< LD
10	$7,53 \cdot 10^{-1}$	$4,06 \cdot 10^{+1}$	$1,20 \cdot 10^{+1}$	$1,39 \cdot 10^{+1}$	$1,75 \cdot 10^{+1}$	$5,09 \cdot 10^{-1}$
11	$7,01 \cdot 10^{-1}$	$3,22 \cdot 10^{+1}$	$1,08 \cdot 10^{+1}$	$1,17 \cdot 10^{+1}$	$1,90 \cdot 10^{+1}$	< LD
12	$7,22 \cdot 10^{-1}$	$3,22 \cdot 10^{+1}$	$1,56 \cdot 10^{+1}$	$1,12 \cdot 10^{+1}$	$1,56 \cdot 10^{+1}$	< LD
13	$7,36 \cdot 10^{-1}$	$3,77 \cdot 10^{+1}$	$1,46 \cdot 10^{+1}$	$9,75 \cdot 10^0$	$2,00 \cdot 10^{+1}$	< LD
14	$8,10 \cdot 10^{-1}$	$3,09 \cdot 10^{+1}$	$1,07 \cdot 10^{+1}$	$9,09 \cdot 10^0$	$1,80 \cdot 10^{+1}$	< LD
15	$7,77 \cdot 10^{-1}$	$4,05 \cdot 10^{+1}$	$4,71 \cdot 10^{+1}$	$9,66 \cdot 10^0$	$4,21 \cdot 10^{+1}$	$4,91 \cdot 10^{-1}$
16	$9,34 \cdot 10^{-1}$	$5,30 \cdot 10^{+1}$	$2,19 \cdot 10^{+1}$	$2,17 \cdot 10^{+1}$	$2,54 \cdot 10^{+1}$	$8,17 \cdot 10^{-1}$
17	$9,46 \cdot 10^{-1}$	$5,08 \cdot 10^{+1}$	$1,59 \cdot 10^{+1}$	$1,90 \cdot 10^{+1}$	$2,82 \cdot 10^{+1}$	$3,70 \cdot 10^{-1}$
18	$9,40 \cdot 10^{-1}$	$4,25 \cdot 10^{+1}$	$1,93 \cdot 10^{+1}$	$1,17 \cdot 10^{+1}$	$2,20 \cdot 10^{+1}$	$5,67 \cdot 10^{-1}$
19	$8,84 \cdot 10^{-1}$	$3,73 \cdot 10^{+1}$	$1,36 \cdot 10^{+1}$	$1,14 \cdot 10^{+1}$	$2,06 \cdot 10^{+1}$	$1,12 \cdot 10^0$
20	$8,04 \cdot 10^{-1}$	$3,39 \cdot 10^{+1}$	$1,15 \cdot 10^{+1}$	$1,20 \cdot 10^{+1}$	$2,17 \cdot 10^{+1}$	$5,63 \cdot 10^{-1}$
21	$3,30 \cdot 10^0$	$6,48 \cdot 10^{+1}$	$2,03 \cdot 10^{+1}$	$2,39 \cdot 10^{+1}$	$3,22 \cdot 10^{+1}$	$1,22 \cdot 10^0$
22	$2,60 \cdot 10^0$	$4,43 \cdot 10^{+1}$	$1,53 \cdot 10^{+1}$	$2,32 \cdot 10^{+1}$	$2,47 \cdot 10^{+1}$	$0,00 \cdot 10^0$
23	$2,79 \cdot 10^0$	$5,74 \cdot 10^{+1}$	$1,51 \cdot 10^{+1}$	$2,84 \cdot 10^{+1}$	$2,61 \cdot 10^{+1}$	$1,77 \cdot 10^0$
24	$2,59 \cdot 10^{+1}$	$5,42 \cdot 10^{+1}$	$2,18 \cdot 10^{+1}$	$3,12 \cdot 10^{+1}$	$2,01 \cdot 10^{+1}$	$3,31 \cdot 10^0$
25	$3,95 \cdot 10^0$	$6,73 \cdot 10^{+1}$	$2,36 \cdot 10^{+1}$	$4,32 \cdot 10^{+1}$	$2,62 \cdot 10^{+1}$	$8,85 \cdot 10^{-1}$
26	$4,47 \cdot 10^0$	$7,25 \cdot 10^{+1}$	$4,36 \cdot 10^{+1}$	$4,74 \cdot 10^{+1}$	$2,60 \cdot 10^{+1}$	$1,92 \cdot 10^0$
LD _{met} mg/Kg	$6,40 \cdot 10^{-2}$	$1,30 \cdot 10^{-1}$	$4,53 \cdot 10^{-1}$	$2,75 \cdot 10^{-1}$	$3,82 \cdot 10^{-1}$	$2,65 \cdot 10^{-1}$

Anexo B

Concentraciones de metales en sedimentos no contaminados.

	<i>Cd</i>	<i>Zn</i>	<i>Cr</i>	<i>As</i>	<i>Cu</i>	<i>Ni</i>	<i>Pb</i>	<i>Al</i>	<i>Se</i>
Concentración mg/Kg									
<i>Sedimentos no contaminados^a</i>	0,2	100	30		25	20	25		
<i>Sedimentos de Fiordos Chilenos^b</i>	0,32	112,3	29,4		16,6	18,6	14,2		
<i>Contenido en Arena^c</i>	<LD	61,3	79,7	9,86	34,9	106	<LD	5330	<LD

	<i>Mn</i>	<i>Ag</i>	<i>V</i>	<i>Ba</i>	<i>Co</i>	<i>Mo</i>	<i>Be</i>	<i>B</i>	<i>Fe</i>
Concentración mg/Kg									
<i>Sedimentos no contaminados^a</i>					10				
<i>Sedimentos de Fiordos Chilenos^b</i>			152,3	551,8	14,1				
<i>Contenido en Arena^c</i>	530	<LD	109	67,8	13,3	12	<LD	10	12900

^a Sedimentos no contaminados según Bryan & Langton, 1992; En: Ahumada y col., 2007.

^b Sedimentos en fiordos y canales australes de Chile, Ahumada y col., 1999.

^c Contenido de metales en arena de la zona de Tongoy, Chile. Cenma.

Anexo C

Valores para construcción de curvas de calidad

Razón límite Cd	Razón límite Zn	Razón límite Cr	Razón límite Cu	Razón límite Ni	Razón límite Pb	% Calidad
0	0	0	0	0	0	100
2,11	2,02	1,77	1,127	1,12	2,12	90
13,2	4,40	5,44	6,51	2,77	7,88	50
26	9	11	13	5	16	0

Anexo D

Valores de índice para las cuatro alternativas propuestas.

Nº Muestra	Valor índice Alternativa 1.1	Valor índice Alternativa 1.2	Valor índice Alternativa 2.1	Valor índice Alternativa 2.2
1	78,2	65,7	3,9	3,4
2	73,7	61,8	4,6	4,0
3	69,2	58,2	4,2	3,7
4	72,8	61,1	6,8	5,9
5	67,5	56,8	4,7	4,0
6	75,6	63,7	9,8	8,5
7	76,4	64,3	15,2	13,2
8	78,1	65,8	3,1	2,7
9	77,4	65,2	5,4	4,7
10	98,0	82,9	0,9	0,7
11	97,9	82,8	0,8	0,7
12	98,5	83,3	0,8	0,7
13	97,7	82,7	0,8	0,7
14	98,1	83,0	0,8	0,7
15	91,0	77,2	1,3	1,1
16	94,9	80,3	1,2	1,0
17	94,4	79,9	1,2	1,0
18	96,6	81,7	1,0	0,9
19	97,1	82,2	0,9	0,8
20	96,9	82,0	0,9	0,7
21	87,9	74,4	2,6	2,1
22	91,5	77,4	2,0	1,7
23	90,3	76,3	2,2	1,8
24	80,5	67,6	14,3	11,4
25	86,4	72,9	3,1	2,5
26	83,8	70,7	3,5	2,9

Anexo E

ICF para 26 muestras analizadas.

Muestra	ICF
1	59
2	59
3	59
4	59
5	59
6	58
7	58
8	58
9	58
10	72
11	72
12	72
13	40
14	40
15	40
16	44
17	44
18	44
19	78
20	78
21	78
22	72
23	72
24	49
25	49
26	49